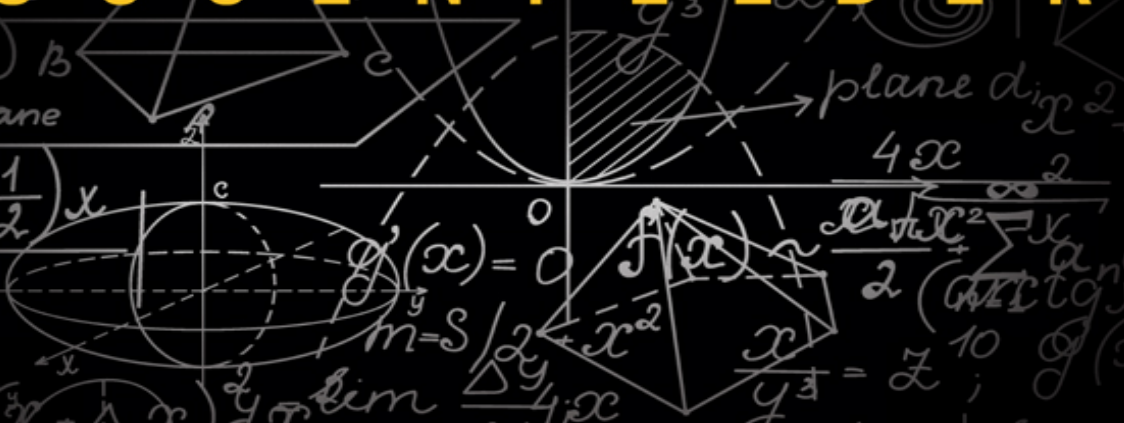
SABINE HOSSENFELDER



ZAGUBIONE w matematyce

FIZYKA W PUŁAPCE PIĘKNA

To szalenie głęboka, prowokująca do myślenia lektura!

– FORBES

Copernicus Center PRESS

SABINE
HOSSENFELDER

ZAGUBIONE
w matematyce

FIZYKA W PUŁAPCE PIĘKNA

Tłumaczenie
Tomasz Miller

Copernicus Center PRESS

Spis treści

Karta redakcyjna

Dedykacja

Motto

Przedmowa

Rozdział 1. Ukryte reguły fizyki
W którym uświadamiam sobie, że już nie rozumiem fizyki. Rozmawiam z przyjaciółmi i kolegami po fachu, zauważam, że nie ja jedna jestem zdezorientowana, i postanawiam sprowadzić rozum z powrotem na Ziemię.

Rozdział 2. Jaki wspaniały świat
W którym czytam dużo książek o nieżyjących ludziach i odkrywam, że każdy lubi piękne idee, ale te nie zawsze działają. Na pewnej konferencji zaczynam się martwić, że fizycy wkrótce odrzucą metodę naukową.

Rozdział 3. Stan państwa
W którym podsumowuję na ponad trzydziestu stronach dziesięć lat edukacji i gawędzę o czasach świetności fizyki cząstek.

Rozdział 4. Pęknięcia w fundamentach
W którym spotykam się z Nimą Arkanim-Hamedem i usiłuję zaakceptować, że natura nie jest naturalna, że wszystko, czego się uczymy, jest super oraz że wszyscy mają w nosie, co myślę.

Rozdział 5. Teorie idealne
W którym poszukuję granic nauki, ale okazuje się, że wyobraźnia fizyków teoretyków jest nieograniczona. Lecę do Austin, pozwalam mówić Stevenowi Weinbergowi oraz odkrywam, ile rzeczy robimy, byle tylko się nie nudzić.

Rozdział 6. Niepojęta pojmowalność mechaniki kwantowej
W którym rozmyślam nad różnicą między matematyką i magią.

Rozdział 7. Jedna, by wszystkimi rządzić
W którym próbuję ustalić, czy kogokolwiek interesowałyby prawa przyrody, gdyby nie były piękne. Zatrzymuję się w Arizonie, gdzie Frank Wilczek zdradza mi swoją małą Teoryjkę Czegoś, a następnie lecę na Maui i słucham Garretta Lisiego. Dowiaduję się też paru brzydkich faktów i podliczam fizyków.

Rozdział 8. Przestrzeń, ostateczna granica
W którym próbuję zrozumieć teoretyka strun i prawie mi się udaje.

Rozdział 9. Wszechświat, wszystko, co istnieje, i cała reszta
W którym zachwycam się rozlicznymi sposobami wyjaśniania, dlaczego nikt nie widzi cząstek, które wymyślamy.

Rozdział 10. Wiedza to potęga
W którym dochodzę do wniosku, że świat byłby lepszy, gdyby wszyscy mnie słuchali.

Podziękowania

Dodatek A. Cząstki modelu standardowego

Dodatek B. Kłopoty z naturalnością

Dodatek C. Jak możesz pomóc?

Źródła i przypisy

© Copyright by Copernicus Center Press, 2019

Copyright © 2018 by Sabine Hossenfelder.
All rights reserved.

Tytuł oryginalny
Lost in math. How beauty leads physics astray

Adiustacja i korekta
Gabriela Niemiec

Projekt okładki
Michał Duława

Grafika na okładce
belkaelf25 | Fotolia.com

Skład
MELES-DESIGN

ISBN 978-83-7886-459-2

Wydanie I
Kraków 2019

Copernicus Center Press Sp. z o.o.
pl. Szczepański 8, 31-011 Kraków
tel. (+48) 12 448 14 12, 500 839 467
e-mail: marketing@ccpress.pl
Księgarnia internetowa: http://ccpress.pl

Konwersja: eLitera s.c.

Dla Mamy

Niebo ciągle mnie zdumiewa
I pragnęłam wierzyć, że
Znów się odnajdę,
Gdy opadnie we mnie gniew.

Sarah McLachlan, *Cisza*
(tłum. własne)

Przedmowa

Byli tak pewni swego, że stawiali na to miliardy. Przez dziesięciolecia fizycy wmawiali nam, że wiedzą, gdzie czekają kolejne odkrycia. Pobudowali akceleratory, wystrzelili w kosmos satelity, a w głębokich kopalniach rozmieścili detektory. Świat był już gotów pozazdrościć fizykom sukcesu. Ale tam, gdzie badacze spodziewali się przełomu, grunt nie ustępował. Eksperymenty nie ujawniły niczego nowego.

Fizyków zawiodła nie tyle matematyka, ile wybór matematyki. Wierzyli, że Matka Natura jest elegancka, prosta i szczodra w udzielaniu wskazówek. Sądzili, że słyszą jej szept, a tymczasem mówili sami do siebie. Teraz jednak natura przemówiła – głośnym i wyraźnym milczeniem.

Jak powszechnie wiadomo, fizyka teoretyczna jest dziedziną trudną, naszpikowaną ciężką matematyką. Niniejsza książka nie zawiera jednak prawie żadnej matematyki. Fizyka, gdy odrzeć ją z równań i technicznych terminów, staje się poszukiwaniem sensu – poszukiwaniem, które przyjęło niespodziewany obrót. Prawa przyrody rządzące naszym wszechświatem, jakiekolwiek by były, nie są takie, jak sądzili fizycy. Nie są takie, jak ja sama sądziłam.

Zagubione w matematyce to opowieść o tym, jak subiektywne poczucie estetyki napędza współczesne badania. To moja osobista historia – refleksja nad tym, czego mnie uczono. Jest to też historia wielu innych fizyków zmagających się z tym samym typem wewnętrznego napięcia: oto wierzymy w piękno praw przyrody, ale czy naukowcom wolno polegać na wierze?

Rozdział 1

Ukryte reguły fizyki

W którym uświadamiam sobie, że już nie rozumiem fizyki. Rozmawiam z przyjaciółmi i kolegami po fachu, zauważam, że nie ja jedna jestem zdezorientowana, i postanawiam sprowadzić rozum z powrotem na Ziemię.

Jak być dobrym naukowcem

Wynajduję nowe prawa przyrody; z tego żyję. Jestem jedną z około dziesięciu tysięcy badaczy, których zadaniem jest ulepszać teorie fizyki cząstek. To właśnie my prowadzimy wykopaliska w piwnicach świątyni wiedzy, badając jej fundamenty. Przyglądamy się pęknięciom, podejrzanym niedostatkom istniejących teorii, i gdy na coś natrafimy, wzywamy doświadczalników, żeby odsłonili głębsze warstwy. W ostatnim stuleciu taki podział pracy między teoretykami i eksperymentalistami działał bardzo dobrze. Jednakże moje pokolenie miało zatrważająco mało sukcesów na tym polu.

Po dwudziestu latach uprawiania fizyki teoretycznej większość moich znajomych robi karierę, badając rzeczy, których nikt nigdy nie widział. Skonstruowali zadziwiające nowe teorie, takie jak idea, że nasz wszechświat jest tylko jednym z nieskończenie wielu, składających się na „wieloświat". Zapostulowali istnienie dziesiątek nowych cząstek, oświadczyli, że jesteśmy rzutami wyżej wymiarowych obiektów oraz że kosmos roi się od tuneli czasoprzestrzennych łączących obszary odległe od siebie.

Pomysły te są wysoce kontrowersyjne, a jednak niezwykle popularne; spekulatywne, ale intrygujące; piękne, lecz

bezużyteczne. Większość z nich tak trudno sprawdzić, że w praktyce są nieweryfikowalne. Innych nie da się przetestować nawet w teorii. Tym, co je łączy, jest zapał teoretyków, przekonanych, że ich matematyka zawiera cząstkę prawdy o przyrodzie. Ich teorie, jak wierzą, są zbyt piękne, żeby nie były prawdziwe.

Wynajdowania nowych praw przyrody – formułowania i rozwijania teorii – nie wykłada się na zajęciach i nie tłumaczy w podręcznikach. Fizycy trochę się tego uczą z historii nauki, ale w większości przejmują tę umiejętność od starszych kolegów, przyjaciół i mentorów, promotorów i recenzentów. Chodzi przede wszystkim o doświadczenie, przekazywaną z pokolenia na pokolenie ciężko wypracowaną intuicję na temat tego, co się sprawdza. Gdy poprosić ich o ocenę, na ile obiecująca jest jakaś nowo wysunięta, ale niesprawdzona teoria, fizycy sięgają po koncepcje naturalności, prostoty, elegancji oraz piękna. Są to ukryte reguły przenikające całą fizykę fundamentalną. Są one nieocenione. A do tego całkowicie niezgodne z naukowym wymogiem obiektywności.

Te ukryte reguły nie przysłużyły się nam dobrze. Chociaż zaproponowaliśmy mnóstwo nowych praw przyrody, żadnego nie udało się potwierdzić. Śledząc narastający kryzys w moim zawodzie, sama doświadczyłam kryzysu osobistego. Nie jestem już pewna, czy to, czym się zajmujemy w podstawach fizyki, jest nauką. A jeśli nie jest, to dlaczego marnuję swój czas?

∞∞

Zajęłam się fizyką, ponieważ nie rozumiem ludzkiego zachowania. Zajęłam się fizyką, ponieważ matematyka mówi jej, jak jest. Lubiłam tę schludność, tę ścisłą maszynerię, tę władzę, jaką matematyka sprawuje nad przyrodą. Minęło dwadzieścia lat i tym,

co uniemożliwia mi zrozumienie fizyki, jest to, że wciąż nie rozumiem ludzkiego zachowania.

– Nie potrafimy podać ścisłych matematycznych reguł określających, czy dana teoria jest atrakcyjna czy nie – mówi Gian Francesco Giudice. – Co jednak zaskakujące, piękno i elegancja teorii są powszechnie podzielane przez ludzi różnych kultur. Gdy powiem ci: „Spójrz, napisałem nowy artykuł, to bardzo elegancka teoria", nie muszę ci wyłuszczać szczegółów; załapiesz, czemu jestem podekscytowany, prawda?

Nie łapię tego. Dlatego właśnie z nim rozmawiam. Niby czemu prawa przyrody miałyby się przejmować moim zmysłem piękna? Taki związek między mną i wszechświatem wydaje mi się bardzo mistyczny, bardzo romantyczny, bardzo nie w moim stylu.

Ale właściwie to Gian nie uważa, że naturze chodzi o *moje* wyczucie piękna, tylko o *jego* wyczucie piękna.

– Przeważnie to takie wewnętrzne przeczucie – mówi. – Nic, co dałoby się matematycznie skwantyfikować; to tak zwana intuicja fizyczna. Jest istotna różnica między tym, jak fizycy i matematycy postrzegają piękno. Dana teoria fizyczna jest uważana za skuteczną i piękną, jeśli w odpowiednich proporcjach dostarcza wyjaśnień faktów empirycznych oraz posługuje się fundamentalnymi zasadami.

Gian jest kierownikiem Zakładu Fizyki Teoretycznej w CERN-ie (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire[1*]). To właśnie tam znajduje się największy obecnie akcelerator cząstek, Wielki Zderzacz Hadronów (*Large Hadron Collider*, LHC), który umożliwia ludzkości jak dotąd najbliższe przyjrzenie się elementarnym cegiełkom materii: kosztujący 6 miliardów dolarów, długi na 27 kilometrów podziemny pierścień, w którym protony[2*] są przyspieszane i zderzane ze sobą niemal przy prędkości światła.

LHC to istne *panopticum* skrajności: superzimne magnesy, ultrawysoka próżnia, klastry komputerowe, które w czasie

eksperymentów rejestrują około trzech gigabajtów danych – co można porównać z kilkoma tysiącami ebooków – na sekundę. Tysiące naukowców, dziesięciolecia badań i miliardy wytworów wysokiej technologii połączonych w jednym celu: aby dowiedzieć się, z czego jesteśmy zbudowani.

– Fizyka to subtelna gra – ciągnie Gian. – Odkrywanie jej zasad wymaga nie tylko racjonalności, ale także subiektywnego osądu. Dla mnie to właśnie ten pozaracjonalny aspekt sprawia, że fizyka jest tak ekscytująca.

Rozmawiam z nim przez telefon ze swojego mieszkania, otoczona tekturowymi pudłami. Mój kontrakt w Sztokholmie właśnie dobiegł końca; czas ruszać w drogę za kolejnym grantem badawczym.

Gdy ukończyłam studia, sądziłam, że społeczność naukowców będzie dla mnie domem, rodziną podobnie myślących odkrywców pragnących zrozumieć naturę. Stawałam się jednak coraz bardziej wyobcowana wśród kolegów po fachu, którzy z jednej strony podkreślają wagę obiektywnego empirycznego osądu, a z drugiej sięgają po kryteria estetyczne, aby bronić swoich ulubionych teorii.

– Gdy znajdujesz rozwiązanie problemu, nad którym pracowałaś, doznajesz tej szczególnej wewnętrznej ekscytacji – mówi Gian. – To chwila, w której nagle zaczynasz dostrzegać strukturę wyłaniającą się zza twojego rozumowania.

Badania Giana skupiają się na rozwijaniu nowych teorii fizyki cząstek, które miałyby rozwiązać problemy istniejących teorii. Opracował pionierską metodę kwantyfikacji tego, jak naturalna jest jakaś teoria, ilościową miarę, która pozwala stwierdzić, jak bardzo dana teoria opiera się na nieprawdopodobnych koincydencjach[1]. Im bardziej naturalna teoria, tym mniej szczęśliwych zbiegów okoliczności wymaga i tym bardziej przekonująca się wydaje.

– Wyczucie piękna teorii fizycznej musi być czymś wbudowanym w nasz mózg; nie jest społecznym konstruktem. Porusza jakąś wewnętrzną strunę – mówi. – Gdy natkniesz się na piękną teorię, doświadczasz tej samej emocjonalnej reakcji co wtedy, gdy stoisz przed dziełem sztuki.

To nie tak, że nie rozumiem, o czym on mówi; ja tylko nie rozumiem, dlaczego ma to jakieś znaczenie. Wątpię, by moje wyczucie piękna było wiarygodnym przewodnikiem w poszukiwaniach fundamentalnych praw przyrody, praw dyktujących zachowanie bytów, do których moje zmysły nie mają, nigdy nie miały i nigdy nie będą mieć bezpośredniego dostępu. Aby było ono wbudowane w mój mózg, musiałoby być korzystne w procesie doboru naturalnego. A jaką ewolucyjną korzyść miałoby przynosić rozumienie grawitacji kwantowej?

A chociaż tworzenie pięknych dzieł sztuki to chwalebne zajęcie, nauka nie jest sztuką. Nie poszukujemy teorii, aby wywoływać emocje; poszukujemy wyjaśnień naszych obserwacji. Nauka stanowi systematyczną próbę przezwyciężenia niedostatków ludzkich zdolności poznawczych i uniknięcia błędnych intuicji. W nauce nie chodzi o emocje – chodzi o liczby i równania, dane i wykresy, fakty i logikę.

Pewnie chciałam, by udowodnił mi, że się mylę.

Gdy pytam Giana, co sądzi o najnowszych danych z LHC, odpowiada:

– Jesteśmy kompletnie zdezorientowani.

Wreszcie coś, co rozumiem.

Porażka

W pierwszych latach od uruchomienia LHC posłusznie wyprodukował cząstkę zwaną bozonem Higgsa, której istnienie przewidziano w latach sześćdziesiątych. Moi koledzy i ja żywiliśmy

wielkie nadzieje, że ten wart miliardy dolarów projekt zdziała więcej, niż tylko potwierdzi to, w co i tak nikt nie wątpił. Znaleźliśmy pewne obiecujące pęknięcia w teoretycznych fundamentach, które przekonały nas, że w zderzaczu uda się wytworzyć również inne, jak dotąd nieodkryte cząstki. Byliśmy w błędzie. Nie zobaczyliśmy za pomocą LHC niczego, co przemawiałoby za naszymi nowo wynalezionymi prawami przyrody.

Naszym przyjaciołom astrofizykom wcale nie poszło lepiej. W latach trzydziestych ubiegłego wieku odkryto, że gromady galaktyk mają o wiele większą masę, niż by wynikało ze zliczania całej zawartej w nich widzialnej materii. Nawet dopuszczając znaczną niepewność danych, potrzeba było nowego typu „ciemnej materii" do wyjaśnienia tych obserwacji. Nagromadzono sporo dowodów na grawitacyjne oddziaływanie ciemnej materii, więc jesteśmy pewni, że istnieje. Tajemnicą pozostaje jednak, z czego się ona składa. Astrofizycy sądzą, że stoi za nią nowy, nieznany na Ziemi typ cząstek, które ani nie pochłaniają, ani nie emitują światła. Opracowali nowe prawa przyrody, niepotwierdzone teorie, aby zaprojektować detektory zdolne przetestować ich pomysły. Począwszy od lat osiemdziesiątych, dziesiątki zespołów doświadczalnych polowały na te hipotetyczne cząstki ciemnej materii. Nie udało się ich wykryć. Nowe teorie pozostały niepotwierdzone.

Podobnie blado wypada kosmologia, w ramach której fizycy na próżno starają się zrozumieć, co sprawia, że wszechświat rozszerza się coraz szybciej, a który to powód nazywają „ciemną energią". Potrafią matematycznie wykazać, że nie chodzi tu o nic innego jak o energię samej pustej przestrzeni, nie potrafią jednak obliczyć ilości tej energii. Jest to jedno z pęknięć w fundamentach, przez które fizycy próbują zajrzeć jak przez dziurkę od klucza, ale jak dotąd nie udało im się dostrzec niczego, co przemawiałoby za

nowymi teoriami wysuniętymi w celu wyjaśnienia natury ciemnej energii.

Tymczasem na polu podstaw mechaniki kwantowej inni nasi koledzy pragną ulepszyć teorię, która nie ma żadnych mankamentów. Wychodzą z przekonania, że coś jest nie tak ze strukturami matematycznymi, które nie odpowiadają mierzalnym wielkościom. Drażni ich to, na co utyskiwali Richard Feynman, Niels Bohr i inni herosi fizyki ostatniego stulecia, że „nikt nie rozumie mechaniki kwantowej". Badacze jej podstaw usiłują stworzyć lepsze teorie, wierząc, tak jak wszyscy inni, że znaleźli właściwe pęknięcie. Niestety, wszystkie eksperymenty podtrzymały przewidywania niepojmowalnej teorii z minionego wieku. A co z nowymi teoriami? To wciąż niesprawdzone spekulacje.

Włożono ogromny wysiłek w przeróżne próby znalezienia nowych praw przyrody. Mimo to już od przeszło trzydziestu lat nie udało nam się ulepszyć podstaw fizyki.

∞∞

A więc chcesz wiedzieć, czytelniku, co trzyma świat w całości, jak powstał kosmos i jakie reguły rządzą naszym istnieniem? Chcąc zbliżyć się do odpowiedzi, musisz ruszyć szlakiem faktów aż do głębokich piwnic nauki. Podążaj nim tak długo, aż fakty zostaną niemal zupełnie wyparte przez spekulacje, a twój pochód zostanie zablokowany przez teoretyków spierających się o to, czyja teoria jest ładniejsza. Wówczas będziesz wiedzieć, że dotarłeś do podstaw.

Podstawy fizyki to te części składowe naszych teorii, które – o ile nam wiadomo – nie dają się wyprowadzić z niczego prostszego. Do tego najniższego poziomu należą obecnie przestrzeń, czas i dwadzieścia pięć cząstek wespół z zestawem równań opisujących ich zachowanie. Przedmiotem badań mojej

dziedziny są zatem cząstki poruszające się w przestrzeni i czasie, które niekiedy wpadają na siebie, tworząc bardziej złożone obiekty. Nie należy o nich myśleć jako o kuleczkach, bo zgodnie z mechaniką kwantową nimi nie są (więcej na ten temat później). Lepiej wyobrażać je sobie jako chmurki, które mogą przybrać dowolny kształt.

W ramach podstaw fizyki zajmujemy się wyłącznie cząstkami, których nie da się już rozłożyć na prostsze składniki. Nazywamy je „cząstkami elementarnymi". Z tego, co obecnie wiemy, nie mają one wewnętrznej struktury. Mogą się natomiast łączyć w atomy, cząsteczki, białka – i w ten sposób tworzą to przeogromne bogactwo struktur, którego doświadczamy dookoła. To właśnie z tych dwudziestu pięciu cząstek zbudowani jesteśmy ty, ja i wszystko inne we wszechświecie.

Ale cząstki same w sobie nie są aż tak interesujące. Ciekawe są dopiero związki między nimi, zasady determinujące ich oddziaływania, struktura praw, które zrodziły wszechświat i umożliwiły nasze istnienie. To właśnie reguły gry, a nie pionki, interesują nas najbardziej. A najważniejsza wyniesiona przez nas lekcja brzmi: natura gra zgodnie z regułami matematyki.

Zbudowane z matematyki

W fizyce teorie są zbudowane z matematyki. Posługujemy się nią nie dlatego, że chcemy odstraszyć ludzi niezaznajomionych z geometrią różniczkową i algebrami Liego z gradacją; posługujemy się nią, ponieważ jesteśmy głupcami. Matematyka pozwala nam zachować rzetelność – chroni nas przed okłamywaniem samych siebie i innych. Z matematyką można się mylić, ale nie da się kłamać.

Naszym zadaniem jako fizyków teoretyków jest zaprzęganie matematyki albo do opisu istniejących obserwacji, albo do

dostarczania przewidywań, które pozwolą obmyślić strategię badań eksperymentalnych. Stosowanie matematyki w rozwoju teorii narzuca im logiczny rygor i wewnętrzną spójność; zapewnia jednoznaczność teorii i odtwarzalność wniosków.

Wykorzystanie matematyki w fizyce przyniosło niesamowite sukcesy, w związku z czym jest obecnie rygorystycznie przestrzeganym standardem. Teorie, które dziś budujemy, są zestawami założeń – matematycznych relacji bądź definicji – razem z regułami interpretacji, które łączą matematykę z rzeczywistymi obserwacjami.

Ale teorii nie tworzy się tak, że zapisuje się założenia, a następnie wyprowadza z nich obserwowalne konsekwencje w ciągu twierdzeń i dowodów. W fizyce teorie prawie zawsze zaczynają jako luźny konglomerat pomysłów. Ogarnianie bałaganu, który fizycy generują, pracując nad jakąś teorią, i znajdowanie schludnego zestawu założeń, z których można już wyprowadzić całą teorię, często zostawia się naszym kolegom trudniącym się fizyką matematyczną – jest to dział matematyki, nie fizyki.

W większości fizycy i matematycy godzą się na zgrubny podział pracy, w ramach którego ci pierwsi narzekają na pedantyczną wybredność tych drugich, a ci drudzy z kolei – na niechlujstwo tych pierwszych. Obie strony są jednak całkowicie świadome, że postęp w jednej dziedzinie napędza postęp w drugiej. Od teorii prawdopodobieństwa przez teorię chaosu po kwantowe teorie pola leżące u podstaw współczesnej fizyki cząstek, matematyka i fizyka zawsze szły do przodu ramię w ramię.

Ale fizyka nie jest matematyką. Oprócz bycia wewnętrznie spójną (czyli wolną od wzajemnie wykluczających się wniosków) dobra teoria musi też być zgodna z obserwacjami (nie może stać w sprzeczności z danymi). W mojej dziedzinie fizyki, gdzie zmagamy się z najbardziej fundamentalnymi kwestiami, jest to

bardzo surowy wymóg. Dysponujemy tak wielką ilością danych, że przeprowadzenie wszystkich niezbędnych obliczeń w ramach nowo wysuniętych teorii może być po prostu niewykonalne. Jest też niepotrzebne, ponieważ istnieje droga na skróty: najpierw wykazujemy, że nowa teoria zgadza się ze starymi, dobrze potwierdzonymi teoriami z dokładnością do niepewności pomiarowych i w ten sposób odtwarza osiągnięcia dotychczasowych modeli; następnie musimy tylko dołączyć obliczenia dla jakichś nowych efektów, które nasza teoria potrafi wyjaśnić.

Udowodnienie, że nowa teoria odtwarza wszystkie osiągnięcia uznanych starych teorii, może być skrajnie trudne. Wynika to stąd, że teoria pretendentka może posługiwać się zupełnie innymi strukturami matematycznymi, w niczym nieprzypominającymi obecnych teorii. Aby wykazać, że nowa teoria mimo wszystko daje te same przewidywania dla już przeprowadzonych obserwacji, nierzadko trzeba ją w odpowiedni sposób przeformułować. Jest to dość proste w sytuacji, gdy nowa teoria zaprzęga techniki matematyczne starej, ale w przypadku stosowania nowej matematyki może to stanowić dużą przeszkodę.

Przykładowo, Einstein przez lata usiłował udowodnić, że ogólna teoria względności – jego nowa teoria grawitacji – odtwarza wszystkie sukcesy swojej poprzedniczki, grawitacji newtonowskiej. Problemem nie było to, że jego nowa teoria była błędna; problem polegał na tym, że Einstein nie wiedział, jak z tej teorii wyprowadzić newtonowski potencjał grawitacyjny. Matematyka Einsteina była w porządku, ale brakowało jej powiązania z rzeczywistym światem. Dopiero po paru nieudanych próbach znalazł właściwy sposób, by to zrobić. Dobra matematyka stanowi tylko część dobrej teorii.

Są też inne powody, dla których stosujemy matematykę w fizyce. Oprócz zapewniania rzetelności matematyka dostarcza

również najbardziej oszczędnej i jednoznacznej terminologii, jaką znamy. Język jest plastyczny; zależy od kontekstu i interpretacji. A matematyka nie przejmuje się kulturą czy historią. Jeśli tysiąc ludzi przeczyta jakąś książkę, to tak, jakby przeczytali oni tysiąc różnych książek. Ale jeśli tysiąc ludzi przeczyta jakieś równanie – to wszyscy przeczytali jedno i to samo równanie.

Głównym powodem stosowania matematyki w fizyce jest jednak to, że możemy ją stosować.

Zazdroszcząc fizykom

Chociaż od wszystkich teorii naukowych wymaga się logicznej spójności, nie wszystkie dyscypliny poddają się modelowaniu matematycznemu – używanie tak ścisłego języka nie ma bowiem sensu, jeśli dane nie spełniają podobnego rygoru ścisłości. A ponieważ ze wszystkich dyscyplin naukowych fizyka zajmuje się najprostszymi układami – jest idealna dla matematycznego modelowania.

Zjawiska badane przez fizykę są wysoce powtarzalne. Dobrze rozumiemy, jak kontrolować środowiska eksperymentów i które efekty mogą być pominięte bez uszczerbku na dokładności wyników. W psychologii, przykładowo, trudniej o replikację rezultatów, bo ludzie różnią się od siebie i nieczęsto wiadomo, które osobiste cechy czy dziwactwa mogą wpływać na przebieg badania. W fizyce nie mamy takich problemów. Atomy helu nie robią się głodne i są równie dobrze usposobione w poniedziałki, jak i w piątki.

To ta precyzyjność sprawia, że fizyka jest tak skuteczna, ale także tak trudna. Dla niewtajemniczonych jej liczne równania mogą wydawać się nieprzystępne, ale posługiwanie się nimi to kwestia wykształcenia i wprawy. To nie konieczność zrozumienia matematyki czyni fizykę trudną. Prawdziwa trudność polega na

znalezieniu właściwej matematyki. Nie można po prostu wziąć jakiejkolwiek matematycznej struktury i nazwać jej teorią. Cała trudność fizyki tkwi w wymogu, by nowa teoria była spójna zarówno wewnętrznie, jak i w połączeniu z eksperymentem. Z absolutnie każdym eksperymentem.

Fizyka teoretyczna jest wysoce rozwiniętą dyscypliną. Teorie, z którymi dzisiaj pracujemy, wyszły zwycięsko z ogromnej liczby sprawdzianów doświadczalnych. Ilekroć teorie przechodzą z powodzeniem takie testy, ich ulepszanie staje się nieco trudniejsze. Nowa teoria musi bowiem pomieścić w sobie wszystkie sukcesy obecnych teorii i być od nich jeszcze odrobinę lepsza.

Dopóki fizycy tworzyli teorie, aby wyjaśnić już przeprowadzone albo nadchodzące eksperymenty, sukces polegał na uzyskaniu właściwych liczb najmniejszym wysiłkiem. Jednak w miarę jak nasze teorie pozwalały opisać coraz więcej, trudniejsze stawało się przetestowanie proponowanych ulepszeń. Od zapostulowania istnienia neutrina do jego detekcji upłynęło dwadzieścia pięć lat, na potwierdzenie istnienia bozonu Higgsa musieliśmy czekać prawie pół wieku, a na bezpośrednią detekcję fal grawitacyjnych – aż sto lat. Obecnie czas potrzebny na przetestowanie nowego fundamentalnego prawa przyrody może być dłuższy niż cała kariera naukowa. To zmusza teoretyków do sięgania po pozaempiryczne kryteria decydowania, które ścieżki badań realizować. Kryterium estetyczne jest jednym z nich.

W naszych poszukiwaniach nowych idei piękno odgrywa wiele ról. Jest przewodnikiem, nagrodą, motywacją. A także źródłem błędów.

Niewidzialni przyjaciele

Ekipa przeprowadzkowa zabrała moje pudła, których w większości nigdy nie chciało mi się rozpakować, gdyż wiedziałam, że tu nie zostanę. Echa dawnych przeprowadzek powracają z pustych szafek. Dzwonię do mojego przyjaciela Michaela Krämera, profesora fizyki w Akwizgranie, w Niemczech.

Michael zajmuje się supersymetrią, w skrócie: SUSY. SUSY przewiduje sporo jak dotąd nieodkrytych cząstek elementarnych – partnerów poszczególnych znanych cząstek oraz kilka dodatkowych. Spośród proponowanych nowych praw przyrody SUSY uchodzi obecnie za najpopularniejsze. Tysiące moich kolegów po fachu oparło na niej swoje kariery naukowe. Jak dotąd jednak nie napotkaliśmy żadnej z tych nowych cząstek.

– Myślę, że zacząłem zajmować się SUSY dlatego, że to nad nią pracowano, gdy byłem studentem w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych – wspomina Michael.

Matematyka supersymetrii jest bardzo zbliżona do tej stosowanej w dobrze ugruntowanych teoriach, w związku z czym standardowy program nauczania fizyki dobrze przygotowuje studentów do pracy nad SUSY.

– To dobrze określony formalizm. Nie był trudny – mówi Michael.

Był to dobry wybór. Michael otrzymał stałe zatrudnienie w 2004 roku i teraz kieruje grupą badawczą New Physics przy Wielkim Zderzaczu Hadronów, finansowaną przez Niemiecką Fundację do spraw Badań.

– No i lubię symetrie. Dlatego SUSY mi się spodobała.

∞∞

Jak już nadmieniłam, w trakcie naszych prób zrozumienia, z czego zbudowany jest świat, znaleźliśmy dwadzieścia pięć różnych

cząstek elementarnych. Supersymetria uzupełnia tę kolekcję o zestaw wciąż nieodkrytych cząstek-partnerów, po jednej dla każdej ze znanych cząstek, oraz o jeszcze kilka dodatkowych. To supersymetryczne uzupełnienie jest eleganckie, ponieważ znane cząstki dzielą się na dwa typy: fermiony i bozony (nazwane tak na cześć Enrica Fermiego i Satyendry Bosego), a SUSY wyjaśnia, co je ze sobą wiąże.

Fermiony są skrajnymi indywidualistami. Nieważne, jak bardzo by się starać, nie uda się zmusić dwóch fermionów do robienia tej samej rzeczy w tym samym miejscu – zawsze muszą się czymś między sobą różnić. Natomiast bozony nie mają takich skrupułów i chętnie przystają na wspólny taniec. To dlatego elektrony, które są fermionami, zajmują osobne powłoki wokół jąder atomowych. Gdyby były bozonami, znajdowałyby się razem na tej samej powłoce, a wszechświat byłby pozbawiony chemii – a także chemików, albowiem nasze własne istnienie jest możliwe dzięki brakowi zgody fermionów na dzielenie się przestrzenią.

Supersymetria postuluje, że prawa przyrody pozostają bez zmian, jeśli zamienimy bozony na fermiony i odwrotnie. Oznacza to, że każdy znany bozon musi posiadać fermionowego partnera, a każdy znany fermion – partnera bozonowego. Ale poza różnicą typu fermion – bozon cząstki-partnerzy muszą być identyczne.

Ponieważ żadnych znanych cząstek nie da się ze sobą pożenić zgodnie z powyższymi wymogami, sądzimy, że nie ma wśród nich par supersymetrycznych. A to z kolei oznacza, że na odkrycie muszą czekać nowe cząstki. To tak, jakbyśmy mieli zestaw wzajemnie niepasujących garnków i pokrywek i w związku z tym byli przekonani, że brakujące elementy muszą gdzieś tam być.

Niestety równania supersymetrii nie mówią nam, ile wynoszą masy cząstek-partnerów. Ponieważ wyprodukowanie cięższych cząstek wymaga więcej energii, wykrycie cząstek o większej masie jest trudniejsze. Wszystko, czego dowiedzieliśmy się do tej pory,

to fakt, iż superpartnerzy, o ile istnieją, są tak masywni, że nasze eksperymenty nie dysponują jeszcze energią wystarczającą do ich wytworzenia.

Supersymetria to gra warta świeczki. Nie tylko ujawniłaby, że bozony i fermiony są dwiema stronami tej samej monety, ale również pomogłaby w unifikacji oddziaływań fundamentalnych, a być może wyjaśniłaby też kilka numerycznych koincydencji. Co więcej, niektóre supersymetryczne cząstki posiadają dokładnie takie własności, jakie powinna posiadać ciemna materia. Opowiem o tym więcej w późniejszych rozdziałach.

∞∞

Supersymetria tak gładko wpisuje się w istniejące teorie, że wielu fizyków jest przekonanych co do jej prawdziwości. „Pomimo wysiłków wielu setek fizyków prowadzących eksperymenty w poszukiwaniu tych cząstek nigdy nie zaobserwowano żadnych superpartnerów", pisze Dan Hooper, fizyk pracujący w Fermilabie. A jednak „nie zniechęciło to fizyków teoretycznych, którzy uparcie sądzą, że przyroda musi być właśnie taka – supersymetryczna. Dla wielu z nich idee stojące za supersymetrią są po prostu zbyt piękne i zbyt eleganckie, by nie stanowiły części naszego wszechświata. Idee te rozwiązują zbyt wiele problemów i wpisują się w nasz świat zbyt naturalnie. W odczuciu tych gorliwych wyznawców cząstki-superpartnerzy po prostu muszą istnieć"[2].

Hooper nie jest jedynym, który podkreśla siłę tego przekonania. „Wielu fizykom teoretycznym trudno uwierzyć, że supersymetria nie pełni jakiejś roli w przyrodzie"[3], zauważa fizyk Jeff Forshaw. Z kolei w artykule *Supersymetria i kryzys w fizyce*, opublikowanym w 2014 roku na łamach „Scientific American", fizycy cząstek Maria Spiropulu i Joseph Lykken wyrażają nadzieję, że dowody na rzecz SUSY w końcu napłyną. Piszą przy tym, iż „nie będzie przesadą,

jeżeli powiemy, że większość fizyków badających cząstki uważa, że supersymetria *musi* być prawdziwa" (podkreślenie autorów)[4].

Uroku dodaje SUSY to, że przez długi czas uważano symetrię wiążącą bozony i fermiony za niemożliwą, wydawało się bowiem, że zakazuje jej pewne twierdzenie matematyczne[5]. Twierdzenia są jednak tylko tak silne, jak ich założenia. Okazało się, że gdy się je osłabi, supersymetria staje się najszerszą symetrią dopuszczalną w ramach istniejących teorii[6]. Czyż przyroda mogłaby nie wykorzystać tak eleganckiej idei?

∞∞

– Według mnie najpiękniejszym aspektem SUSY zawsze było to, że jest największą możliwą symetrią – wspomina Michael. – To do mnie przemawiało. Gdy dowiedziałem się o tym, pomyślałem: „A to ciekawe!", bo sama idea: narzucanie pewnych symetrii i otrzymywanie stąd właściwych praw przyrody, nawet bez dokładnego zrozumienia, dlaczego to działa, wydaje mi się potężną zasadą. Uznałem, że warto pójść tym tropem.

Gdy byłam studentką, pod koniec lat dziewięćdziesiątych, najprostsze wersje SUSY weszły już w konflikt z danymi doświadczalnymi i rozpoczął się proces konstruowania bardziej skomplikowanych, ale wciąż jeszcze dopuszczalnych modeli[7]. W moim odczuciu była to dziedzina, w której nie da się powiedzieć niczego nowego bez uprzedniej detekcji przewidywanych cząstek. Postanowiłam trzymać się z dala od SUSY do czasu, aż to nastąpi.

Nie nastąpiło. Nie znaleziono żadnych dowodów na rzecz SUSY w Wielkim Zderzaczu Elektronowo-Pozytonowym (*Large Electron-Positron Collider*, LEP), który pracował do 2000 roku. Nic też nie znaleziono w Tevatronie, zderzaczu, który osiągał wyższe energie niż LEP i działał do roku 2011. Jeszcze potężniejszy LHC, który

wykorzystuje tunel, gdzie mieścił się LEP, pracuje od 2008 roku, ale jak dotąd SUSY się nie pojawiła.

Mimo to martwię się, że popełniłam wielki błąd, nie zajmując się dziedziną, którą tak wielu moich kolegów uważało i wciąż uważa za niezmiernie obiecującą.

Przez wiele lat panowało przekonanie, że coś nowego musi się pojawić w LHC, bo w przeciwnym razie najlepszy istniejący opis fizyki cząstek – model standardowy – nie byłby naturalny w sensie miar wprowadzonych między innymi przez Giana Francesca Giudicego. Matematyczne wzory pozwalające kwantyfikować naturalność opierają się na założeniu, że teoria zawierająca bardzo duże lub bardzo małe liczby nie jest elegancka.

Przez resztę tej książki będziemy się zastanawiać, czy założenie to jest uzasadnione. Na razie wystarczy powiedzieć, że jest powszechne. W swoim artykule z 2008 roku Giudice wyjaśniał: „Pojęcie naturalności [...] rozwinęło się poprzez »kolektywny ruch« w społeczności fizyków, którzy coraz bardziej podkreślali jej znaczenie w kwestii istnienia fizyki wykraczającej poza model standardowy”[8]. Im głębiej studiowano naturalność, tym wyraźniejsza stawała się potrzeba szybkiego dokonania nowych odkryć, jeśli mamy uniknąć brzydkich numerycznych zbiegów okoliczności.

– Gdy patrzę wstecz, zadziwia mnie, jaki nacisk położono na argument z naturalności – mówi Michael. – Ludzie powtarzali ten sam argument raz za razem, tak naprawdę nigdy się nad nim nie zastanawiając. Mówili wciąż to samo przez dziesięć lat. To naprawdę zaskakujące, że był to główny czynnik stymulujący rozwój tak wielu modeli. Z dzisiejszej perspektywy uznaję to za dziwne. Wciąż uważam, że naturalność ma w sobie urok, ale nie jestem już przekonany, że prowadzi do nowej fizyki w LHC.

LHC ukończył swój pierwszy etap działania (tak zwany kurs, ang. *run*) w lutym 2013 roku, po czym został wyłączony w celu

dokonania ulepszeń. Drugi etap, przy wyższych energiach, rozpoczął się w kwietniu 2015 roku. Gdy rozmawiam z Michaelem, jest już październik i w najbliższych miesiącach oczekujemy wstępnych rezultatów drugiego kursu.

– Powinnaś pogadać z Arkanim-Hamedem – radzi Michael. – Jest zwolennikiem naturalności, bardzo ciekawy człowiek. Jest naprawdę wpływowy, zwłaszcza w Stanach. To niesamowite. Przez jakiś czas nad czymś pracuje, gromadzi zwolenników, a po roku zabiera się do czegoś innego. Dziesięć lat temu pracował nad modelem z naturalną SUSY i opowiadał o nim tak przekonująco, że wszyscy zaczęli się temu przyglądać. A już dwa lata później wypuścił artykuł o SUSY nienaturalnej!

Nima Arkani-Hamed stał się znany pod koniec lat dziewięćdziesiątych, gdy wspólnie z Savasem Dimopoulosem i Gią Dvalim wysunął hipotezę, że nasz wszechświat może posiadać dodatkowe wymiary zwinięte w pętlę o małym promieniu, ale na tyle dużym, by dało się przeprowadzić testy za pomocą akceleratorów cząstek[9]. Pomysł, że istnieją dodatkowe wymiary, nie jest nowy – pojawił się już w latach dwudziestych XX wieku[10]. Geniusz Arkaniego-Hameda i jego współpracowników polegał na zapostulowaniu, że wymiary te są tak duże, iż wkrótce będzie możliwe eksperymentalne przetestowanie tej hipotezy, a to z kolei zainspirowało tysiące fizyków do przeprowadzenia obliczeń i publikacji dalszych szczegółów. Argumentem, który przemawiał za rychłym odkryciem dodatkowych wymiarów w LHC, była naturalność. „Z wymogu naturalności wynika, że przejście w wyższe wymiary nie może ujawniać się dużo później niż w skali TeV”, przekonywali badacze w swojej pierwszej pracy na temat nazwanego później od ich inicjałów modelu ADD[3*]. Ich artykuł został jak dotąd zacytowany ponad pięć tysięcy razy. To czyni go jednym z najbardziej cytowanych fizycznych artykułów wszech czasów.

W 2002 roku, gdy utknęłam nad wybraną przez siebie tematyką doktoratu – dotyczącą pewnego wariantu teorii dodatkowych wymiarów z lat dwudziestych XX wieku – mój promotor przekonał mnie, bym jednak zajęła się jej współczesną inkarnacją. W ten sposób również ja napisałam parę artykułów na temat doświadczalnego badania istnienia dodatkowych wymiarów za pomocą LHC. Ale LHC nie znalazł żadnych dowodów na ich istnienie. Zaczęłam kwestionować argumenty z naturalności. Tymczasem Nima Arkani-Hamed przeszedł od zajmowania się dużymi dodatkowymi wymiarami do SUSY i obecnie jest profesorem fizyki w Instytucie Studiów Zaawansowanych w Princeton.

Zapamiętałam sobie, żeby porozmawiać z Nimą.

– Rzecz jasna, jest o wiele trudniej osiągalny niż ja. Nie sądzę, by tak łatwo odpowiadał na maile – mówi mi Michael. – Jest jednym z tuzów fizyki cząstek w Stanach. Forsuje argument, że potrzebujemy zderzacza osiągającego 100 TeV, żeby przetestować naturalność. A teraz być może Chińczycy zbudują taki zderzacz, kto wie!

W miarę jak staje się coraz bardziej jasne, że LHC nie dostarczy oczekiwanego dowodu na piękniejsze prawa przyrody, fizycy cząstek po raz kolejny zaczynają pokładać nadzieję w następnym, większym zderzaczu. Nima jest jednym z głównych orędowników skonstruowania nowego kołowego akceleratora cząstek w Chinach.

Jednak bez względu na to, co udałoby się jeszcze odkryć w wyższych energiach, fakt, iż LHC jak dotąd nie znalazł żadnych nowych cząstek elementarnych, oznacza, że poprawna teoria jest nienaturalna w świetle standardów fizyków. Wpędziliśmy się w sytuację iście zakrawającą na oksymoron: oto według naszych własnych wymogów piękna natura okazała się nienaturalna.

– Czy się martwię? Nie wiem. Jestem zdezorientowany – mówi Michael. – Szczerze zdezorientowany. Przed LHC myślałem, że coś na pewno znajdziemy. A teraz? Dezorientacja.

Brzmi znajomo.

W skrócie

- Fizycy stosują dużo matematyki i są bardzo dumni, że działa to tak dobrze.
- Fizyka nie jest jednak matematyką, a rozwój teorii potrzebuje danych doświadczalnych jako wskazówek.
- W niektórych działach fizyki istotnie nowe dane nie pojawiły się od dziesięcioleci.
- Wobec braku wskazówek z eksperymentów teoretycy stosują kryteria estetyczne.
- Gdy te ostatnie nie działają, fizycy stają się zdezorientowani.

Rozdział 2

Jaki wspaniały świat

W którym czytam dużo książek o nieżyjących ludziach i odkrywam, że każdy lubi piękne idee, ale te nie zawsze działają. Na pewnej konferencji zaczynam się martwić, że fizycy wkrótce odrzucą metodę naukową.

Skąd przychodzimy

W szkole nienawidziłam historii, ale z czasem uświadomiłam sobie przydatność cytowania nieżyjących ludzi na poparcie swoich przekonań. Nie będę nawet próbowała przedstawiać tu pełnych dziejów roli piękna w nauce, bo zdecydowanie bardziej od przeszłości interesuje mnie przyszłość, a także dlatego, że zrobili to już inni[1]. Ale jeśli mamy zobaczyć, jak zmieniła się fizyka, muszę opowiedzieć, jaka była dawniej.

Aż do końca XIX wieku wśród uczonych dość powszechne było postrzeganie piękna przyrody jako znaku boskości. W miarę jak poszukiwano – i znajdowano – wyjaśnienia na polach uprzednio zarezerwowanych dla Kościoła, niepojęta harmonia odsłaniana przez prawa przyrody upewniała ludzi religijnych, że nauka nie stanowi zagrożenia dla sfery nadprzyrodzonej.

Na przełomie stuleci, gdy nauka oddzieliła się od religii i stała się bardziej sprofesjonalizowana, uczeni przestali przypisywać piękno praw przyrody boskiemu zamysłowi. Zadziwiała ich harmonia w regułach rządzących wszechświatem, ale jej interpretację pozostawiali otwartą, a przynajmniej zastrzegali, że ich wiara jest prywatną opinią.

W XX wieku zalety estetyczne stopniowo awansowały z „bonusowej” cechy teorii naukowych do zasady przewodniej w ich konstruowaniu, a wreszcie przyjęły formę wymogów matematycznych. Obecnie nie tyle zastanawiamy się nad elegancją teorii, ile obliczamy ją ze wzoru. Nienaukowe pochodzenie argumentów z piękna zostało „zagubione w matematyce”.

∞∞

Do pierwszych uczonych formułujących ilościowe prawa przyrody należał niemiecki matematyk i astronom Johannes Kepler (1571–1630), którego badania były silnie motywowane wiarą religijną. Kepler stworzył model Układu Słonecznego, w którym znane wówczas planety – Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz i Saturn – krążyły wokół Słońca po kołowych orbitach[4*]. Promienie tych orbit były wyznaczone przez wielościany foremne – bryły platońskie – umieszczone jeden wewnątrz drugiego, a uzyskane w ten sposób odległości między planetami dobrze zgadzały się z obserwacjami. Była to urzekająca idea: „Jest absolutnie konieczne, by dzieło doskonałego Stwórcy odznaczało się najwyższym pięknem”[5*], twierdził Kepler.

Później, za pomocą tablic zawierających dokładne pozycje planet, Kepler przekonał się, że jego model był błędny, i wywnioskował, że planety poruszają się wokół Słońca po elipsach, a nie po okręgach. Ta nowa idea natychmiast spotkała się z dezaprobatą; astronomowi nie udało się sprostać estetycznym wymogom swoich czasów.

Jednym z jego krytyków był Galileusz (1564–1641), który uważał, iż „jedynie ruch kołowy może istotnie odpowiadać ciałom przyrodzonym, wchodzącym w skład wszechświata i znajdującym się w stanie najdoskonalszego ładu”[2]. Inny astronom, David Fabricius (1564–1617), narzekał, że „swoją elipsą [Keplerze]

obalasz okrężność i jednostajność ruchów, co jawi mi się tym bardziej absurdalnym, im głębiej się nad tym zastanawiam". Fabricius, podobnie jak wielu w tym czasie, wolał korygować orbity planetarne poprzez dołączanie „epicykli", czyli ruchów po mniejszych okręgach krążących po głównych kołowych orbitach. „Gdybyś tylko potrafił zachować doskonałą kołową orbitę, wyjaśniając swoją orbitę eliptyczną dodatkowym małym epicyklem – pisał Fabricius Keplerowi – byłoby to znacznie lepsze"[3].

A jednak to Kepler miał rację. Planety rzeczywiście krążą wokół Słońca po elipsach.

W swoim późniejszym życiu, długo po tym, jak dane obserwacyjne zmusiły go do porzucenia pięknych wielościanów, Kepler nabrał przekonania, że planety generują muzykę podczas swojego ruchu po orbitach. W opublikowanym w 1619 roku dziele *Harmonices Mundi* [Harmonia Świata] opisał melodię każdej z planet, dochodząc do wniosku, że „Ziemia wyśpiewuje mi-fa-mi". Nie była to jego najlepsza praca. Niemniej analizy orbit planetarnych przeprowadzone przez Keplera położyły grunt pod późniejsze badania Izaaka Newtona (1643–1727), pierwszego uczonego rygorystycznie stosującego matematykę.

Newton wierzył w istnienie Boga, którego ślad dostrzegał w regułach rządzących przyrodą: „Ten najpiękniejszy układ Słońca, planet i komet może wynikać jedynie z zamiaru i zwierzchnictwa jakiejś rozumnej i potężnej istoty"[4], napisał w 1726 roku. „Każda nowo odkryta prawda, każdy eksperyment lub twierdzenie, jest kolejnym odzwierciedleniem piękna Bożego"[6*]. Od czasu swojego powstania newtonowskie prawa ruchu i grawitacji doczekały się gruntownych modyfikacji, ale do dziś pozostają w użyciu jako dobre przybliżenia.

Newton i jemu współcześni nie mieli oporów przed łączeniem religii z nauką – w tamtych czasach była to powszechnie

akceptowana praktyka. Być może najlepszym przykładem był Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) – uczony, który rozwinął rachunek różniczkowy mniej więcej w tym samym czasie co Newton, choć dokonał tego niezależnie. Leibniz wierzył, że świat, który zamieszkujemy, jest „najlepszym z możliwych światów" i całe istniejące zło jest konieczne. Argumentował, że to, co jawi nam się jako niedostatki świata, w istocie „opiera się tylko na właściwej nam znikomej znajomości ogólnej harmonii wszechświata i ukrytych racji Boskich postępków"[5]. Innymi słowy, według Leibniza brzydkie jest brzydkie, ponieważ nie rozumiemy, czym jest piękno.

Argument Leibniza, przy całym upodobaniu, z jakim filozofowie i teologowie o nim dyskutują, jest bezużyteczny bez zdefiniowania, co właściwie oznacza „najlepszy". Niemniej stojąca za nim idea, że nasz wszechświat jest w jakimś sensie optymalny, zakorzeniła się w nauce i z upływem wieków znacząco się rozwinęła. Gdy wyrażono ją matematycznie, przerodziła się w giganta, na którego barkach stoją wszystkie teorie współczesnej fizyki[6]. Dzisiejsze teorie różnią się jedynie tym, co w ich ramach rozumie się przez „najlepszy" sposób, w jaki ma się zachowywać dany układ fizyczny. Przykładowo, ogólna teoria względności Einsteina daje się wyprowadzić z wymogu, by krzywizna czasoprzestrzeni była najmniejsza, jak to możliwe; podobne metody istnieją dla pozostałych oddziaływań. Wciąż jednak fizykom nie udało się odkryć jakiejś wszechogarniającej zasady, zgodnie z którą nasz wszechświat jest „najlepszy" – do zagadnienia tego wrócimy jeszcze później.

Jak znaleźliśmy się w takiej sytuacji

W miarę upływu stuleci matematyka stawała się coraz potężniejsza, a odniesienia do Boga pojawiały się w fizyce coraz rzadziej lub zlewały się z samymi prawami przyrody. Pod koniec

XIX wieku Max Planck (1858–1947) uważał, że „świętość niepojmowalnego Bóstwa wyraża się w świętości symboli". Potem, gdy wiek XIX ustąpił miejsca XX, piękno stopniowo przekształciło się w zasadę przewodnią dla fizyków teoretyków, a zmianę tę przypieczętowało powstanie modelu standardowego.

Hermann Weyl (1885–1955), matematyk, który wniósł istotny wkład do fizyki, nie wstydził się swoich niezbyt naukowych metod: „W swojej pracy starałem się łączyć prawdę i piękno, lecz gdy musiałem wybierać między nimi, zwykle wybierałem piękno"[7]. Astrofizyk Edward Arthur Milne (1896–1950), który wywarł wpływ na rozwój ogólnej teorii względności, postrzegał „piękno jako drogę do wiedzy, czy raczej jako jedyną wiedzę wartą posiadania". W swoim przemówieniu na zebraniu Klubu Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu w Cambridge (*Cambridge University Natural Science Club*) z 1922 roku narzekał na zalew badań urągających poczuciu estetyki:

> Wystarczy tylko przejrzeć archiwa periodyków naukowych, powiedzmy sprzed pięćdziesięciu lat, aby natknąć się na dziesiątki artykułów, które ani trochę nie przyczyniły się do poszerzenia wiedzy naukowej i które przyczynić się nie mogły, niczym huby na pniu drzewa poznania, tak jak one pojawiające się wciąż na nowo, gdy je wyplenić... [Jeśli jednak artykuł] wywołuje w nas te emocje, które kojarzymy z pięknem, niepotrzebne jest żadne dodatkowe uzasadnienie; nie mamy bowiem do czynienia z grzybem, lecz z kwiatem; to granica nauki, kres łańcucha dociekań, w którym poznanie osiąga swój ostateczny cel. To szpetne artykuły są tymi, które wymagają uzasadnienia[8].

Paul Dirac (1902–1984), noblista, którego równanie nazwano jego imieniem, poszedł o krok dalej i przedstawił następującą instrukcję: „Badacz w swoich wysiłkach na rzecz wyrażenia fundamentalnych praw natury w formie matematycznej powinien głównie kierować się matematycznym pięknem"[9]. Innym razem, gdy poproszono go o podsumowanie własnej filozofii fizyki, Dirac

podszedł do tablicy i napisał: „PRAWA FIZYCZNE POWINNY POSIADAĆ MATEMATYCZNE PIĘKNO”[10]. Historyk Helge Kragh zakończył swoją biografię Diraca obserwacją, że „po 1935 roku [Dirac] właściwie nie dokonał już w fizyce niczego o trwałej wartości. Zwróćmy przy tym uwagę, że zasada matematycznego piękna przyświecała jego myśleniu tylko w tym późniejszym okresie”[11].

Albert Einstein, którego nie trzeba przedstawiać, w ciągu lat wytężonej pracy wprowadził się w stan, w którym wierzył, iż prawa przyrody można odkrywać samą tylko myślą:

> Jestem o tym przekonany, że drogą czysto matematycznej konstrukcji zdołamy odnaleźć owe pojęcia oraz prawa zależności zachodzących pomiędzy nimi, co da nam klucz do zrozumienia zjawisk przyrody. [...] Uważam zatem w pewnym znaczeniu za prawdę, że czyste myślenie może ująć rzeczywistość w taki sposób, w jaki o tym marzono w starożytności[12].

Uczciwie dodajmy jednak, że przy innych okazjach podkreślał potrzebę obserwacji[7*].

Jules Henri Poincaré, który wniósł znaczący wkład zarówno do matematyki, jak i fizyki, ale bodaj najlepiej znany jest ze swojego odkrycia zjawiska chaosu deterministycznego, wychwalał praktyczne aspekty piękna: „[T]roska o piękno prowadzi do tego samego wyboru, co troska o użyteczność”[13]. Poincaré uważał „ekonomię myślenia” (*Denkökonomie* – termin wprowadzony przez Ernsta Macha) za „źródło piękna i praktyczną korzyść”. Jak twierdził, ludzki zmysł estetyczny „odgrywa rolę owego subtelnego sita” pomagającego badaczowi stworzyć dobrą, harmonijną teorię, a „harmonia ta jest jednocześnie zadowoleniem naszych potrzeb estetycznych i pomocą dla umysłu, który podpiera i który prowadzi”[14].

Z kolei Werner Heisenberg, jeden z twórców mechaniki kwantowej, mocno wierzył, że piękno ściśle łączy się z prawdą: „Gdy przyroda prowadzi nas do form matematycznych o wielkiej prostocie i wielkim pięknie, [...] to nie można się wtedy powstrzymać od przekonania, że są one »prawdziwe«, to znaczy, że przedstawiają prawdziwą cechę przyrody”[15]. Jak wspominała jego żona:

> Pewnej księżycowej nocy spacerowaliśmy po górze Hainberg[8*], a [Werner], kompletnie zachwycony swoimi wizjami, próbował wytłumaczyć mi swoje najnowsze odkrycie. Mówił o cudzie symetrii jako pierwotnym archetypie stworzenia, o harmonii, o pięknie prostoty i o jego wewnętrznej prawdzie[16].

Strzeżcie się spacerów przy świetle księżyca z fizykami teoretykami – czasem ponosi nas entuzjazm.

Z czego jesteśmy zbudowani

Gdy byłam nastolatką, w latach osiemdziesiątych, nie było zbyt wiele książek popularnonaukowych o współczesnej fizyce teoretycznej albo, uchowaj Boże, matematyce. W poszukiwaniu inspiracji trzeba było sięgać do biografii nieżyjących ludzi. Wertując książki w bibliotece, wyobrażałam sobie siebie jako fizyka teoretyka, rozsiadłą w skórzanym fotelu i pykającą fajkę, snującą doniosłe myśli i w rozkojarzeniu gładzącą swą brodę. Coś było nie tak z tym wyobrażeniem. Ale roztoczona wizja, iż matematyka plus myśl są w stanie rozszyfrować naturę, wywarła na mnie głębokie wrażenie. Jeśli była to umiejętność, której można się nauczyć, to ja chciałam się jej nauczyć.

Jedną z nielicznych książek popularnonaukowych, która opowiadała o fizyce współczesnej w latach osiemdziesiątych, była *Fearful Symmetry* [Złowroga symetria] Anthony’ego Zee[17]. Autor,

który wówczas był i wciąż jest profesorem fizyki na Uniwersytecie Kalifornijskim w Santa Barbara, pisał: „Moi koledzy i ja jesteśmy intelektualnymi spadkobiercami Alberta Einsteina; lubimy myśleć, że my również poszukujemy piękna". Wyłożył także program: „W bieżącym stuleciu fizycy stali się coraz bardziej ambitni [...]. Nie zadowalając się już tylko wyjaśnianiem tego czy innego zjawiska, nabrali wiary, że natura opiera się na zasadach o pięknej prostocie".

Nie tylko „nabrali wiary", ale również znaleźli sposób na jej wyrażenie w postaci matematycznej: „Fizycy rozwinęli pojęcie symetrii jako obiektywnego kryterium oceny praw natury – pisał Zee. – Mając dane dwie teorie, fizycy czują, że ta z nich, która ogólnie rzecz biorąc, jest bardziej symetryczna, jest piękniejsza. Z punktu widzenia fizyka piękno *oznacza* symetrię".

∞∞

Dla fizyka symetria to zasada organizująca, dzięki której unika się zbędnych powtórzeń. Każdy rodzaj wzoru, podobieństwa lub porządku da się ująć matematycznie jako przejaw symetrii. Obecność symetrii zawsze ujawnia pewną nadmiarowość i pozwala na dokonanie uproszczeń. Symetrie pozwalają zatem wyjaśnić więcej mniejszymi środkami.

Przykładowo, zamiast mówić, że dzisiejsze niebo jest niebieskie na zachodzie, wschodzie, północy, południu, południowym zachodzie i tak dalej, mogę po prostu powiedzieć, że jest niebieskie po każdej stronie świata. Taka niezależność od kierunku to symetria obrotowa, dzięki której wystarczy opisać wygląd układu z jednej strony i dodać, że tak samo wygląda z każdej innej. Korzyść polega na mniejszej liczbie słów lub – w przypadku naszych teorii – na mniejszej liczbie równań.

Symetrie, z którymi mają do czynienia fizycy, to bardziej abstrakcyjne warianty powyższego prostego przykładu, takie jak

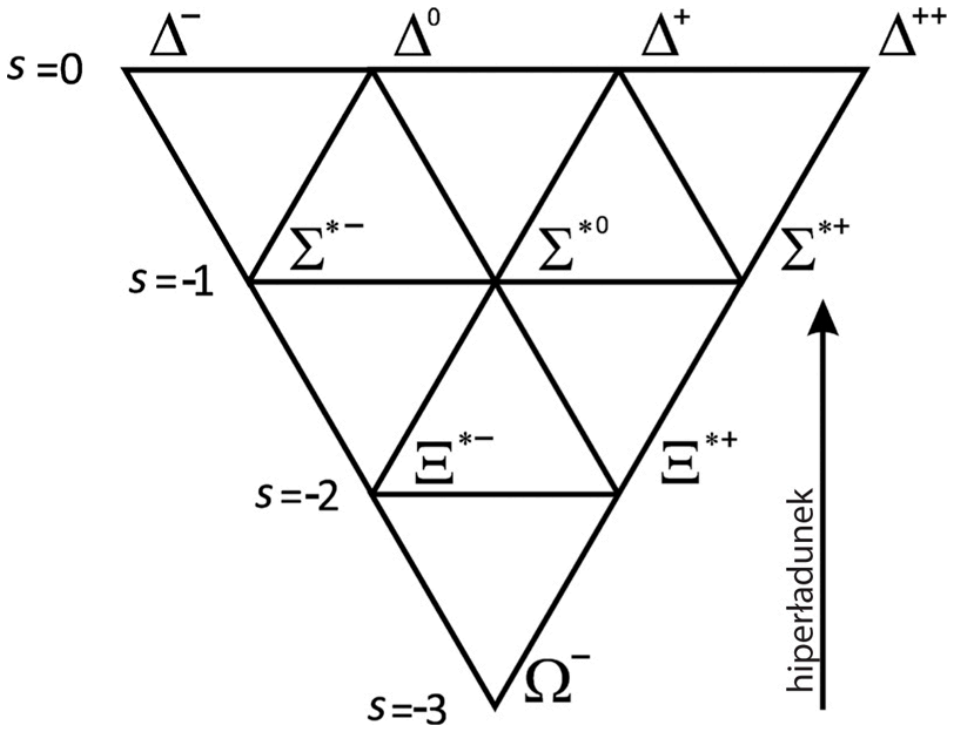
obroty wokół wielu osi w wewnętrznych przestrzeniach matematycznych. Niemniej jednak zawsze działa to tak samo: znajdź przekształcenie, pod którego działaniem prawa przyrody pozostają niezmienione, i oto masz symetrię. Takim przekształceniem symetrii może być cokolwiek, co da się opisać jako jednoznaczna procedura – przesunięcie, obrót, odbicie albo jakaś inna wymyślna operacja. Jeśli z punktu widzenia praw przyrody w jej wyniku nic się nie zmienia, to mamy do czynienia z symetrią. Dzięki temu oszczędzamy sobie trudu tłumaczenia zmian, do których prowadzi ta operacja; zamiast tego możemy po prostu stwierdzić, że żadnych zmian nie ma. To właśnie machowska „ekonomia myślenia".

W fizyce posługujemy się wieloma różnymi typami symetrii, ale jedno jest dla nich wspólne: stanowią potężne zasady unifikujące, albowiem tłumaczą, jak pozornie różne rzeczy są ze sobą w istocie głęboko związane przekształceniem symetrii. Ale często wcale nie jest łatwo znaleźć właściwą symetrię, która uprościłaby ogromny zbiór danych.

Za najbardziej oszałamiający sukces zasad symetrii można uważać powstanie modelu kwarkowego. Od czasów pojawienia się zderzaczy cząstek w latach trzydziestych XX wieku fizycy rozpędzali w nich cząstki do coraz wyższych energii. W połowie lat czterdziestych osiągali już energie pozwalające na badanie struktury jądra atomowego, a liczba znanych cząstek zaczęła szybko rosnąć. Najpierw pojawiły się naładowane piony i kaony. Potem przyszły neutralny pion i neutralny kaon, pierwsze rezonanse delta, cząstka nazwana lambdą, naładowane sigmy, cząstki rho, cząstka omega, eta, K z gwiazdką, mezon phi – a to był dopiero początek. Enrico Fermi, zagadnięty przez Leona Ledermana, co sądzi o niedawnym odkryciu cząstki ochrzczonej mianem K-zero-dwa, odrzekł: „Młody człowieku, gdybym potrafił zapamiętać te wszystkie nazwy, zostałbym botanikiem"[18].

Fizycy odkryli łącznie setki cząstek, wszystkie były niestabilne i szybko się rozpadały. Wydawały się nie mieć ze sobą jakiegokolwiek widocznego związku, w całkowitej sprzeczności z nadzieją, że prawa przyrody okażą się prostsze dla bardziej podstawowych składników materii. Do lat sześćdziesiątych ujęcie tej „menażerii cząstek" w ramy zrozumiałej teorii stało się ważnym celem badawczym.

Jedno z najpopularniejszych podejść w tym czasie radziło po prostu porzucić pragnienie wyjaśnienia i zestawić własności cząstek w dużej tabelce – tak zwanej macierzy rozpraszania lub macierzy S – która była przeciwieństwem piękna i ekonomii. I wtedy pojawił się Murray Gell-Mann. Zidentyfikował właściwe własności cząstek – tak zwane hiperładunek oraz izospin – i okazało się, że wszystkie cząstki da się sklasyfikować w symetryczne układy znane jako multiplety.



Rysunek 1. Dekuplet barionowy stanowi przykład wykorzystania symetrii w fizyce teoretycznej. Na podstawie jego niekompletności Gell-Mann przewidział istnienie cząstki omega minus (Ω^-), umieszczonej w dolnym wierzchołku.

Później stało się jasne, że regularności w multipletach oznaczają, iż obserwowane cząstki składają się z mniejszych obiektów, których – z powodów nierozumianych wówczas dobrze – nigdy nie zaobserwowano w izolacji. Gell-Mann nazwał te mniejsze obiekty składowe „kwarkami”[19]. Lekkie cząstki złożone, tak zwane mezony, są zbudowane z dwóch kwarków[9*], a cięższe cząstki złożone, tak zwane bariony – z trzech kwarków. (Wszystkie mezony są niestabilne. Do barionów należą neutrony i protony, z których zbudowane są jądra atomowe).

Symetria w wynikających stąd prawidłowościach, gdy już się ją odkryje, jest doskonale widoczna (por. rysunek 1). Co ciekawe, gdy Gell-Mann wyszedł z tą ideą, niektóre multiplety były jeszcze niekompletne. Kierując się wymogami symetrii, uczony przewidział istnienie cząstek wypełniających luki we wzorcach,

w szczególności barionu znanego jako omega minus. Cząstkę tę wkrótce odkryto i miała ona własności obliczone przez Gell-Manna, jemu samemu zaś przyznano w 1969 roku Nagrodę Nobla. Piękno zatriumfowało nad brzydkim, postmodernistycznym podejściem opartym ma macierzy S.

Epizod ten był tylko początkiem pasma sukcesów na koncie symetrii. Zasady bazujące na symetriach przysłużyły się też najpierw rozwinięciu teorii, a ostatecznie – unifikacji oddziaływań elektromagnetycznych i słabych jądrowych w postaci tak zwanych oddziaływań elektrosłabych. Również silne oddziaływania jądrowe udało się wyjaśnić w terminach symetrii między cząstkami elementarnymi. Co więcej, nawet teoria względności Einsteina: szczególna i ogólna, daje się opisać jako przejawy pewnego typu symetrii.

∞∞

Podstawą współczesnej wiary pokładanej przez fizyków w pięknie jest zatem rola, jaką odegrało ono w rozwoju modelu standardowego i ogólnej teorii względności; wiarę tę powszechnie racjonalizuje się jako opartą na doświadczeniu: zauważono, że działa, a zatem rozsądnie jest jej się trzymać. Sam Gell-Mann zauważa, że „w fizyce fundamentalnej piękna lub elegancka teoria ma większą szansę na bycie poprawną niż teoria, która jest nieelegancka”[20]. Lederman, ów młody człowiek, który pytał Fermiego o cząstkę K-zero-dwa, także zdobył Nagrodę Nobla i również on nawrócił się na wiarę w piękno: „Wierzymy, że przyroda daje się najlepiej opisać równaniami, które są tak proste, piękne, zwarte i uniwersalne, jak to tylko możliwe”[21].

Steven Weinberg, któremu przyznano Nagrodę Nobla za zunifikowanie oddziaływań elektromagnetycznych i słabych, lubi podawać analogię do hodowli koni: „[Hodowca koni] patrzy na konia i stwierdza: »To piękny koń«. Być może wyraża czysto

estetyczny sąd, ale uważam, że jest w tym coś więcej. Hodowca widział już mnóstwo koni i z doświadczenia wie, że ma przed sobą okaz zdolny wygrywać wyścigi”[22].

Ale tak jak doświadczenie w pracy z końmi nie pomoże w budowie samochodu wyścigowego, tak też doświadczenie nabyte dzięki teoriom z ubiegłego wieku może okazać się niezbyt przydatne w próbach ich ulepszenia. Bez uzasadnienia płynącego z doświadczenia piękno jest czymś przysłowiowo subiektywnym. Dzisiejsi fizycy dostrzegają ów jawny konflikt z metodą naukową, ale mimo to stosowanie kryteriów estetycznych stało się szeroko akceptowaną praktyką. Im dany obszar badań jest odleglejszy od eksperymentalnego testu, tym istotniejsza staje się warstwa estetyczna jego teorii.

Zwłaszcza w podstawach fizyki, które są tak odległe od eksperymentalnej weryfikacji, jak to tylko możliwe w nauce w ramach adekwatności tego terminu, wpływ sądów estetycznych jest szczególnie wyraźny. Ledwie paru moich kolegów usiłuje zaprzeczać, że poświęcają większą uwagę teoriom, które uważają za ładne. Po ich archetypowych zastrzeżeniach przed stosowaniem subiektywnych ocen następuje nieuniknione „ale” oraz odwołanie do powszechnej praktyki.

Dla przykładu, Frank Wilczek, który wspólnie z Davidem Grossem oraz Hugh Davidem Politzerem zdobył w 2004 roku Nagrodę Nobla za prace nad silnym oddziaływaniem jądrowym, w swojej książce *Piękne pytanie* pisze, iż „[n]asze wyczucie piękna nie jest w żaden bezpośredni sposób dostosowane do podstawowych praw Przyrody”. Ale „[u]jrzawszy piękno w jądrze naszego świata, nabraliśmy apetytu na więcej. Moim zdaniem, w tych poszukiwaniach trudno o lepszego przewodnika niż piękno”[23].

Gerard ’t Hooft, który jako pierwszy sformułował matematyczne kryterium naturalności, przyświecające obecnie większości badań

w teoretycznej fizyce cząstek (i który także zdobył Nagrodę Nobla), przestrzega: „Piękno to niebezpieczna koncepcja, ponieważ zawsze może człowieka zwieść. Jeśli dysponujesz teorią, która jest piękniejsza, niż się początkowo spodziewałeś, może to wskazywać, że jest poprawna, że masz rację. Nie ma tu jednak żadnej gwarancji. Teoria może być piękna w twoich oczach, ale po prostu błędna. Nic na to nie poradzisz". Ale: „Z pewnością, gdy czytamy o nowych teoriach i widzimy, jak są piękne i proste, przemawia to znacznie na ich korzyść. Sądzimy, że tego typu teorie mają znacznie większe szanse na to, by okazać się skutecznymi"[24].

W swoim bestsellerze *Piękno wszechświata* teoretyk strun Brian Greene (który nie zdobył Nagrody Nobla) zapewnia czytelnika: „Sądy odnoszące się do estetyki nie rozstrzygają [...] dyskusji naukowych". I kontynuuje: „Z pewnością jednak pewne decyzje fizyków-teoretyków związane są z odczuciami estetycznymi, zwracającymi uwagę na to, które teorie odznaczają się taką samą elegancją i pięknem jak nasz świat. [...] Na razie podejście to dało dobre rezultaty"[25].

Abstrakcyjna matematyka jest trudna w przekazie, więc tę całą opowieść o poszukiwaniach piękna można by uznać za zabieg marketingowy popularyzatorów nauki. Jednak książki popularnonaukowe nie tylko przybliżają trudne tematy – ukazują też, jak fizycy teoretycy myślą i pracują.

W czym tkwi piękno

Triumfy ostatniego stulecia są wciąż świeże w umysłach badaczy przechodzących obecnie na emeryturę, a ich nacisk położony na piękno ogromnie wpłynął na kolejne pokolenie – moje pokolenie, któremu się nie udało. Pracujemy ze sformalizowaną wersją estetycznych ideałów przeszłości: symetrią, unifikacją i naturalnością.

Wydaje się najzupełniej rozsądne, by czerpać z przeszłego doświadczenia i wybierać to, co wcześniej zadziałało. Bylibyśmy wszak głupi, gdybyśmy nie trzymali się rad tych, którzy byli przed nami. Ale bylibyśmy też głupi, gdybyśmy na tym poprzestawali. Jestem ostrożna i staję się coraz ostrożniejsza z każdym negatywnym rezultatem. Piękno to zdradliwy przewodnik, który już wielokrotnie sprowadził fizyków na manowce.

∞∞

> To, że te relacje, w całej swojej matematycznej abstrakcji, przejawiają niewiarygodny stopień prostoty, stanowi dar, który możemy tylko pokornie przyjąć. Nawet Platon nie mógłby przypuszczać, że są aż tak piękne. Albowiem te wzajemne związki nie mogą być wymyślone; one istniały od stworzenia świata[26].

Tak pisał Heisenberg w liście do swojej siostry Edith w roku 1958. Owe piękne relacje, do których się tu odnosi, wcale jednak nie dotyczą jego mechaniki kwantowej. W tym okresie swojego życia Heisenberg próbował bezskutecznie stworzyć nową, zunifikowaną teorię, obecnie stanowiącą niewiele więcej niż przypis w książkach historycznych.

Tymczasem, gdy przyjrzymy się tym spośród pomysłów Heisenberga, które osiągnęły sukces, okaże się, że jego prac naukowych nie postrzegano raczej jako cudów piękności. Współczesny mu Erwin Schrödinger komentował: „Wiedziałem oczywiście o [teorii Heisenberga], ale czułem się zniechęcony, by nie powiedzieć: odstręczony, przez metody algebry transcendentalnej, które wydawały mi się trudne, i przez brak możliwości wizualizacji”[27]. Nie żeby Heisenberg był milszy, gdy chodziło o pomysły Schrödingera. W liście do Wolfganga Pauliego pisał: „Im bardziej zastanawiam się nad fizyczną częścią teorii Schrödingera, tym bardziej mnie ona odpycha. To, co Schrödinger pisze o możliwości wizualizacji swojej teorii [...] Sądzę, że to

bzdura”[28]. Koniec końców okazało się, że podejścia zarówno Heisenberga, jak i Schrödingera stanowią części jednej i tej samej teorii.

Nadejście mechaniki kwantowej nie było jedyną klęską piękna w fizyce. Bryły platońskie, których Kepler użył do obliczenia orbit planet i o których wspomnieliśmy już wcześniej, mogą stanowić najlepiej znany przykład konfliktu między ideałami estetycznymi a faktami. Przykładem z bliższych nam czasów, bo sięgającym pierwszej połowy XX wieku, jest model wszechświata znany jako teoria stanu stacjonarnego.

W 1927 roku Georges Lemaître znalazł rozwiązanie równań ogólnej teorii względności, które doprowadziło go do wysunięcia hipotezy, iż wszechświat wypełniony materią, taki jak nasz, rozszerza się. Wyciągnął wniosek, że wszechświat musiał mieć początek – „Wielki Wybuch”[10*]. Einstein, gdy po raz pierwszy zetknął się z tym rozwiązaniem, uznał ten pomysł za „wstrętny”, o czym poinformował Lemaître’a[29]. Zamiast tego wprowadził do swoich równań dodatkowy składnik – stałą kosmologiczną – aby wymusić na wszechświecie statyczną konfigurację.

Tymczasem w 1930 roku Arthur Eddington, który był kluczową postacią w zorganizowaniu pierwszego eksperymentalnego sprawdzianu ogólnej teorii względności, wykazał, iż einsteinowskie rozwiązanie ze stałą kosmologiczną jest niestabilne: nawet najmniejsza zmiana w rozkładzie materii doprowadziłaby do kolapsu lub ekspansji wszechświata opisanego tym rozwiązaniem. Niestabilność ta, w połączeniu z obserwacjami dokonanymi przez Edwina Hubble’a, wspierającymi ideę Lemaître’a, skłoniła Einsteina do uznania, że wszechświat się rozszerza.

Jednak jeszcze przez wiele dziesięcioleci po tych wydarzeniach kosmologia była uboga w dane obserwacyjne i dostarczała tym samym pola do debaty filozoficznej i estetycznej. Zwłaszcza Arthur Eddington trzymał się einsteinowskiego statycznego

wszechświata, ponieważ wierzył, że stała kosmologiczna reprezentowała nowe oddziaływanie w przyrodzie. Odrzucał ideę Lemaître'a na gruncie tego, że „pojęcie początku świata jest dla mnie odpychające".

W późniejszych latach Eddington stworzył „fundamentalną teorię", która rzekomo miała łączyć kosmologię statyczną z teorią kwantów. Rozwijając ją, odpłynął w swój własny kosmos: „W nauce niekiedy żywimy przekonania co do prawidłowego rozwiązania jakiegoś problemu, które są nam bliskie, ale których nie potrafimy uzasadnić; jesteśmy pod wpływem jakiegoś wrodzonego zmysłu dostosowania rzeczy [*fitness of things*]". Z powodu narastającej niezgodności z danymi fundamentalna teoria Eddingtona nie była rozwijana po jego śmierci w 1944 roku.

Idea niezmiennego wszechświata pozostała jednak popularna. Aby uzgodnić ją z obserwowaną ekspansją, Hermann Bondi, Thomas Gold oraz Fred Hoyle wysunęli w 1948 roku hipotezę, że materia jest w sposób ciągły produkowana między galaktykami. W takim scenariuszu żylibyśmy w wiecznie rozszerzającym się wszechświecie, ale pozbawionym początku i końca.

Zwłaszcza motywacje Freda Hoyle'a opierały się na estetyce. Naigrawał się z Lemaître'a, przezywając go „facetem od Wielkiego Wybuchu" („*the Big Bang man*"), i przyznawał: „Mam estetyczne uprzedzenia do Wielkiego Wybuchu"[30]. Gdy w 1992 roku Amerykanin George Smoot ogłosił wyniki pomiarów fluktuacji temperatury mikrofalowego promieniowania tła, przemawiające przeciwko teorii stanu stacjonarnego, Hoyle (który zmarł w 2001 roku) ich nie zaakceptował. Zmodyfikował swój model do „kosmologii stanu quasi-stacjonarnego", aby pasował do danych. Jego wytłumaczeniem sukcesu idei Lemaître'a było stwierdzenie, iż „przyczyną, przez którą naukowcy lubią Wielki Wybuch, jest długi cień rzucany przez Księgę Rodzaju"[31].

Ideały estetyczne doprowadziły też do bodaj najdziwniejszego epizodu w historii fizyki: popularności „teorii wirów", której celem było wyjaśnienie różnorodności atomów za pomocą różnego typu węzłów[32]. Teoria węzłów to interesujący dział matematyki, który obecnie rzeczywiście posiada zastosowania w fizyce, ale opis struktury atomów do nich nie należy. Niemniej jednak teoria wirów w szczytowym momencie skupiała około dwudziestu pięciu uczonych, głównie w Wielkiej Brytanii, ale także w Stanach Zjednoczonych, którzy napisali kilkadziesiąt artykułów w okresie od 1870 do 1890 roku. W tamtych czasach była to całkiem spora i produktywna społeczność.

Zwolenników teorii wirów przekonywało do niej – pomimo całkowitego braku dowodów – jej piękno. W 1883 roku, w krótkim artykule przeglądowym dla czasopisma „Nature", Oliver Lodge określił teorię wirów jako „piękną" i jako „teorię, o której można śmiało powiedzieć, że zasługuje na to, aby być prawdziwą"[33]. Albert Michelson (który w przyszłości miał zdobyć Nagrodę Nobla), w 1903 roku napisał, że teoria wirów „powinna być prawdziwa, choć taką nie jest"[34]. Kolejnym jej fanem był James Clerk Maxwell, który wyraził opinię:

> Jednak rzeczą najbardziej godną polecenia [w teorii wirów] z filozoficznego punktu widzenia jest to, iż jej sukces w wyjaśnianiu zjawisk nie opiera się na pomysłowości, z jaką jej zwolennicy „zachowywaliby pozory" poprzez wprowadzanie jednej hipotetycznej siły za drugą. Gdy raz wprawi się atom wirowy w ruch, wszystkie jego własności są jednoznacznie ustalone i zdeterminowane prawami ruchu płynu pierwotnego, które to prawa są w pełni wyrażone fundamentalnymi równaniami [...]. Trudności tej metody są przeogromne, ale chwała wynikająca z ich przezwyciężenia byłaby jedyna w swoim rodzaju[35].

Bez względu na to, jak być powinno, teoria wirów zdezaktualizowała się po pomiarach wewnętrznej struktury

atomów oraz w wyniku nadejścia mechaniki kwantowej.

Co więcej, historia nauki nie tylko jest pełna pięknych idei, które okazały się błędne, lecz znaleźć w niej można także brzydkie idee, które okazały się poprawne.

Przykładowo, sam Maxwell nie przepadał za elektrodynamiką w wydaniu, które stworzył, bo nie potrafił oprzeć jej na modelu mechanicznym. W tamtym czasie obowiązującym standardem piękna był mechaniczny wszechświat-zegar, tymczasem w teorii Maxwella pola elektromagnetyczne po prostu *są* – nie są zbudowane z niczego innego, żadnych przekładni ani zębatek, żadnych płynów ani zaworów. Maxwell był niezadowolony z własnej teorii, ponieważ według niego tylko „kiedy zjawisko fizyczne daje się całkowicie opisać jako zmiana w konfiguracji i ruchu układu materialnego, wówczas można powiedzieć, że dynamiczne wyjaśnienie tego zjawiska jest kompletne". Maxwell przez wiele lat usiłował wyjaśnić pola elektryczne i magnetyczne za pomocą czegoś, co wpasowywałoby się w światopogląd mechanistyczny. Niestety na próżno.

Mechanicyzm był wówczas w modzie. William Thomson (późniejszy lord Kelvin) uważał, że bez modelu mechanicznego fizycy nie mogą twierdzić, iż naprawdę zrozumieli dane zagadnienie[36]. Ludwig Boltzmann, według relacji jego studenta Paula Ehrenfesta, „w oczywisty sposób czerpał silną przyjemność estetyczną, gdy pozwalał swojej wyobraźni bawić się galimatiasem współzależnych ruchów, sił i reakcji aż do osiągnięcia punktu, w którym dawały się pojąć"[37]. Późniejsze pokolenia fizyków po prostu stwierdziły, że takie mechanistyczne wyjaśnienia są zbędne, i przywykły do pracy z polami.

Pół wieku później elektrodynamikę kwantową – skwantowaną wersję maxwellowskiej elektrodynamiki – również uważano za pozbawioną powabu. Teoria ta prowadziła do pojawiania się nieskończoności, które trzeba było usuwać prowizorycznymi

metodami, wprowadzonymi wyłącznie po to, aby wychodziło coś sensownego. Było to podejście pragmatyczne, które wcale nie podobało się Diracowi: „Ostatnia praca Lamba, Schwingera, Feynmana i innych okazała się dużym sukcesem [...] ale otrzymana teoria jest nieelegancka, niekompletna i nie może być uważana za satysfakcjonujące rozwiązanie problemu elektronu”[38]. Gdy zapytano go o opinię na temat ostatnich osiągnięć w elektrodynamice kwantowej, Dirac odrzekł: „Mógłbym uznać te nowe pomysły za poprawne, gdyby tylko nie były takie brzydkie”[39].

W kolejnych dekadach znaleziono lepsze sposoby na radzenie sobie z nieskończonościami. Okazało się, że elektrodynamika kwantowa zachowuje się dobrze, a nieskończoności mogą być w niej jednoznacznie usunięte poprzez wprowadzenie dwóch parametrów, których wartości trzeba wyznaczyć doświadczalnie: masę oraz ładunek elektronu. Te tak zwane metody renormalizacji są w użyciu do dziś. Pomimo dezaprobaty Diraca elektrodynamika kwantowa wciąż ma swoje miejsce u podstaw fizyki.

Podsumowując moją historyczną wycieczkę: kryteria estetyczne działają do czasu, aż przestają. Najbardziej wymownym dowodem na nieskuteczność wyczucia estetycznego wspartego na doświadczeniu może być to, że żaden fizyk teoretyk nie zdobył Nagrody Nobla dwukrotnie[40].

Dlaczego ufać teoretykowi?

Jest grudzień, Monachium. Przyjechałam do Centrum Filozofii Matematycznej, by wziąć udział w konferencji, która ma odpowiedzieć na pytanie „Dlaczego ufać teorii?”[11*]. Spotkanie zorganizował austriacki filozof Richard Dawid, którego ostatnia książka, zatytułowana *String theory and the scientific method* [Teoria strun a metoda naukowa], wywołała wśród fizyków niemałe poruszenie[41].

Teoria strun stanowi obecnie najpopularniejszy pomysł na zunifikowaną teorię oddziaływań. Zakłada ona, iż wszechświat wraz z całą zawartością jest zbudowany z małych drgających strun, które mogą być pętelkami lub też mieć luźne końce, mogą się rozciągać lub zwijać, dzielić lub zlewać. I to już wyjaśnia wszystko: materię, czasoprzestrzeń i tak – ciebie też. Przynajmniej taka jest idea. Teoria strun nie dysponuje jak dotąd żadnym przemawiającym za nią dowodem eksperymentalnym. Historyk Helge Kragh porównał ją, również podczas konferencji, do teorii wirów[42].

Richard Dawid w swojej książce używa teorii strun jako przykładu na stosowanie „nieempirycznej oceny teorii". Ma przez to na myśli, że w procesie wyboru dobrej teorii jej zdolność do opisu obserwacji nie jest jedynym kryterium. Jak twierdzi, pewne kryteria, które nie są oparte na obserwacjach, także są filozoficznie sensowne, i wyciąga stąd wniosek, że należy rozszerzyć metodę naukową tak, aby dawało się wartościować hipotezy na gruncie czysto teoretycznym. Proponowane przez Richarda przykłady takiego nieempirycznego wartościowania – stanowiące argumenty często przytaczane przez teoretyków strun na rzecz ich teorii – to: (1) brak alternatywnych wyjaśnień, (2) stosowanie matematyki, która już wcześniej działała, oraz (3) odkrycie niespodziewanych związków.

Richard nie tyle mówi, że kryteria te *powinny* być stosowane, ile zwraca po prostu uwagę, że *są* stosowane, a on dostarcza dla nich uzasadnienia. Wsparcie od filozofa zostało ciepło przyjęte przez teoretyków strun. Przez innych już mniej.

W odpowiedzi na proponowaną przez Richarda modyfikację metody naukowej kosmologowie Joe Silk i George Ellis ostrzegli przed „zrywaniem ze stuleciami filozoficznej tradycji definiowania wiedzy naukowej jako empirycznej", a w szeroko znanym komentarzu opublikowanym w „Nature" wyrazili swoją obawę, że

„fizyka teoretyczna ryzykuje, iż stanie się ziemią niczyją między matematyką, fizyką i filozofią, która do końca nie spełnia wymogów żadnej z nich”[43].

Obawiam się czegoś nawet gorszego. Jeśli już zaakceptujemy nową filozofię, która promuje wybieranie teorii, opierając się na czymś innym niż fakty, to czemu poprzestawać na fizyce? Wyobrażam sobie przyszłość, w której klimatolodzy wybierają modele zgodnie z kryteriami wyśnionymi przez jakiegoś filozofa. Na samą myśl się pocę.

Ale głównym powodem mojego udziału w tej konferencji jest potrzeba uzyskania odpowiedzi na pytania, które przyciągnęły mnie do fizyki. Pragnę wiedzieć, jak zaczął się wszechświat, czy czas składa się z pojedynczych chwil i czy rzeczywiście wszystko można wytłumaczyć za pomocą matematyki. Nie oczekuję, że filozofowie odpowiedzą na te pytania. Ale może jednak mają rację i przyczyną naszego braku postępu jest to, że nasza nieempiryczna ocena teorii jest do bani.

Filozofowie mają z pewnością rację, że w toku formułowania teorii posługujemy się kryteriami innymi niż zgodność z obserwacjami. To, że nauka polega na generowaniu i późniejszym testowaniu hipotez, to tylko część prawdy. Przetestowanie wszystkich możliwych hipotez jest po prostu niewykonalne; dlatego obecnie większość naukowej działalności – od przyznawania stopni akademickich przez recenzowanie artykułów aż do praktyki badań naukowych – kładzie nacisk na identyfikowanie dobrych hipotez. Standardy społeczności istotnie się różnią między dziedzinami, a każda z nich stosuje swoje własne filtry jakości, ale wszyscy przestrzegamy jakichś standardów. W praktyce, nawet jeśli nie było to wpisane w naszą filozofię, ocena teorii prowadząca do preselekcji hipotez jest od dawna częścią metody naukowej. Nie zwalnia nas to od

przeprowadzania eksperymentalnych sprawdzianów, ale jest konieczne, żeby w ogóle dojść do etapu eksperymentu.

A zatem w podstawach fizyki zawsze wybieraliśmy teorie na gruncie innym niż eksperymentalny test. Musimy tak postępować, albowiem często naszym celem nie jest wyjaśnienie istniejących danych, ale stworzenie teorii, którą mamy nadzieję przetestować w przyszłości – jeśli uda nam się przekonać kogoś, by się tego podjął. Ale jak mamy zdecydować, nad którą teorią pracować, zanim ją przetestujemy? I jak doświadczalnicy mają zdecydować, którą teorię warto sprawdzić? Oczywiście dokonujemy w tym celu oceny nieempirycznej. Chodzi tylko o to, że w przeciwieństwie do Richarda nie uważam, iż używane przez nas kryteria są jakoś bardzo filozoficzne. Przeważnie są one raczej społeczne i estetyczne. I wątpię, by miały wbudowany mechanizm samonaprawy.

Argumenty z piękna zawiodły nas w przeszłości i obawiam się, że właśnie jestem świadkiem ich kolejnej porażki.

I co z tego? – można spytać. Czyż w końcu wszystko się nie układało? Układało się. Ale pomijając nawet to, że być może zaszlibyśmy już dalej, gdyby fizycy nie byli zajęci pięknem, to fizyka uległa zmianie – i wciąż się zmienia. W przeszłości sobie radziliśmy, ponieważ dane zmuszały fizyków teoretyków do rewizji chybionych ideałów estetycznych. Ale obecnie coraz częściej jest tak, że to teoria decyduje, które eksperymenty mają największą szansę na odkrycie nowych zjawisk, a przeprowadzenie tych eksperymentów może wymagać dziesięcioleci i miliardów dolarów. Dane nie przychodzą już do nas same – musimy z góry wiedzieć, gdzie je znaleźć, a nie możemy przecież szukać wszędzie. Im więc trudniejsze stają się nowe eksperymenty, tym ostrożniejsi powinni być teoretycy, aby w pogoni za pięknym snem niechcący nie zawędrować w ślepą uliczkę. Nowe warunki wymagają nowych metod. Ale jakich metod?

Mam nadzieję, że filozofowie mają jakiś plan.

∞∞

Konferencja odbywa się w głównym budynku Uniwersytetu Ludwika i Maksymiliana w Monachium, pierwotnie ukończonym w 1840 roku i odbudowanym po częściowym zniszczeniu podczas II wojny światowej. Sklepienie posiada zaokrąglone łuki, a podłogi są marmurowe, korytarzami po obu stronach biegną kolumnady, co jakiś czas trafia się dekoracja w postaci witraża lub gaśnicy. W pokoju konferencyjnym nieżyjący ludzie spoglądają z olejnych obrazów w złotych ramach. Spotkanie rozpoczyna się dokładnie o dziesiątej rano.

W warsztatach bierze również udział Gordon „Gordy" Kane, amerykański fizyk cząstek. Gordy jest autorem kilku książek popularnonaukowych o fizyce cząstek i supersymetrii, znany jest również ze swoich wysiłków, by połączyć teorię strun z modelem standardowym. Twierdzi, że potrafi wyprowadzić z teorii strun wniosek, iż cząstki supersymetryczne muszą pojawić się w LHC.

Podczas wystąpienia Kane'a wśród fizyków wybucha spór. Kilku z nich wdaje się w dyskusję z prelegentem, aż pewien filozof głośno obwieszcza, że chciałby usłyszeć resztę referatu.

– Kiedy to jest właśnie ta część, którą nazywamy metodą naukową! – prycha David Gross, długoletni zwolennik teorii strun „polecający serdecznie" książkę Richarda Dawida[44], ale potem siada.

Pozostajemy z wątpliwościami, czy przewidywania Kane'a rzeczywiście wynikają z teorii strun, czy też wykorzystał on pewne ręcznie dobrane założenia, które pozwoliły mu odtworzyć to, co już wiadomo o modelu standardowym.

Gordy może wyolbrzymiać ścisłość swojego rozumowania, ale wykonuje ciężką robotę, będąc jednym z nielicznych próbujących

znaleźć drogę od pięknej idei teorii strun z powrotem do skomplikowanej rzeczywistości fizyki cząstek. Ścieżka Gordy'ego wiedzie przez supersymetrię, która stanowi nieodłączną część teorii strun. Choć odkrycie superpartnerów nie udowodniłoby poprawności teorii strun, byłoby pierwszym kamieniem milowym na drodze łączącej teorię strun z modelem standardowym.

W swojej książce z 2001 roku Gordy określił supersymetrię jako „cudowną, piękną i wyjątkową" i przejawiał wówczas pewność, że LHC odkryje superpartnerów. Opierał swoje przekonanie na argumentach z naturalności. Jeśli założyć, że teoria supersymetryczna zawiera wyłącznie ładne liczby – ani zbyt duże, ani zbyt małe – to można oszacować masy superpartnerów. „Na szczęście spodziewane masy są na tyle niewielkie, że superpartnerzy zostaną niebawem odkryci", pisał Gordy i tłumaczył, że „jeśli zastosowane podejście jest poprawne, masy superpartnerów nie mogą być dużo większe od masy bozonu Z". To jednak oznacza, że jeśli superpartnerzy istnieją, już dawno temu powinniśmy ich dostrzec w LHC.

∞∞

Szacunki Gordy'ego opierają się na jednej z głównych motywacji supersymetrii: chodzi o uniknięcie konieczności precyzyjnego dostrojenia masy bozonu Higgsa, jednej z dwudziestu pięciu cząstek modelu standardowego. Argument ten jest reprezentatywny dla wielu podobnych stwierdzeń, z którymi zetkniemy się później, i dlatego przyjrzymy mu się bliżej.

Bozon Higgsa jest jedyną znaną cząstką swojego typu i wiąże się z nim specyficzny matematyczny problem, który nie dotyczy innych cząstek elementarnych: ogromny wkład do jego masy wnoszą fluktuacje kwantowe. Zwykle taki wkład jest mały, ale w przypadku bozonu Higgsa prowadzi on do masy znacznie wyższej niż to, co obserwujemy – w istocie wielokrotnie wyższej,

o czynnik 10^{14}. Nie chodzi więc o jakąś drobną odchyłkę, ale o dramatyczny, nieakceptowalny błąd[12*].

To, że obliczenia dają zły wynik dla masy bozonu Higgsa, można łatwo naprawić. Wystarczy zmodyfikować teorię przez odjęcie pewnego wyrazu, tak by różnica dawała już obserwowaną masę. Taki zabieg jest możliwy, ponieważ ani odjemna, ani odjemnik nie są mierzalne osobno; jedynie ich różnica jest. Jednakże wykonanie tej operacji wymaga delikatnego dobrania odejmowanego wyrazu, tak aby prawie, ale nie do końca, kasował się wkład od fluktuacji kwantowych.

Aby zapewnić to delikatne znoszenie się wyrazów, potrzeba liczby, która jest równa tej generowanej przez fluktuacje kwantowe na pierwszych czternastu cyfrach i różni się od niej dopiero na cyfrze piętnastej. Jednak sytuacja, w której para tak bliskich sobie liczb jest dziełem przypadku, wydaje się mało prawdopodobna. Wyobraźmy sobie, że wyciągamy dwa losy z ogromnej misy zawierającej wszystkie możliwe numery piętnastocyfrowe. Gdyby wylosowane przez nas numery były identyczne z wyjątkiem ostatniej cyfry, pomyślelibyśmy, że musi istnieć jakieś wyjaśnienie – może losy nie były zbyt dobrze wymieszane albo ktoś tu nas nabiera.

Fizycy czują to samo, gdy widzą dwie wielkie liczby o podejrzanie małej różnicy, która jest niezbędna, by otrzymać poprawną masę Higgsa – ich zdaniem wymaga to wyjaśnienia. Ale w przypadku praw przyrody nie wyciągamy losów z misy. Mamy tylko te prawa i nie mamy jak ocenić, na ile są one prawdopodobne lub nieprawdopodobne. A zatem to, że masa Higgsa prosi się o wyjaśnienie, jest w istocie przeczuciem, a nie faktem.

Fizycy nazywają liczby, które wydają się wymagać wyjaśnienia, „precyzyjnie dostrojonymi” (*fine-tuned*), podczas gdy teoria pozbawiona precyzyjnie dostrojonych parametrów nazywana jest

„naturalną”[13*]. Często definiuje się też naturalną teorię jako taką, która posługuje się wyłącznie liczbami bliskimi 1. Te dwa rozumienia naturalności są równoważne, albowiem jeśli jakieś liczby są sobie bliskie, ich różnica jest znacznie mniejsza niż 1[14*].

Reasumując, liczby bardzo duże, bardzo małe albo leżące bardzo blisko siebie nie są naturalne. W modelu standardowym masa Higgsa nie jest naturalna, a to czyni ją brzydką.

Supersymetria znacznie poprawia sytuację, albowiem dzięki niej fluktuacje kwantowe nie wnoszą zbyt dużego wkładu do masy Higgsa. Zapewnia owo wymagane delikatne znoszenie się dużych wyrazów bez konieczności precyzyjnego dostrojenia. Pozostają tylko bardziej umiarkowane wkłady pochodzące od mas superpartnerów. Zakładając, że wszystkie te masy są naturalne, można dojść do wniosku, że pierwsi superpartnerzy powinni pojawiać się przy energiach niewiele wyższych niż sam bozon Higgsa. Wynika to stąd, iż gdyby superpartnerzy byli od niego znacznie cięższi, ich wkłady musiałyby być kasowane przez precyzyjnie dostrojony wyraz, aby w rezultacie dawać mniejszą masę Higgsa. I choć jest to możliwe, to byłoby dość absurdalne wprowadzać do SUSY precyzyjne dostrojenie, skoro jedną z głównych motywacji przyświecających tej teorii jest właśnie próba jego uniknięcia.

Na wypadek gdybym zagubiła cię w kwantowej matematyce, rozumowanie jest tu następujące: nie lubimy małych liczb, więc znaleźliśmy sposób, by ich uniknąć, i jeśli jest on poprawny, to powinniśmy odkryć nowe cząstki. Nie jest to przewidywanie, lecz życzenie. Mimo to tego typu rozumowania stały się tak powszechne, że fizycy cząstek posługują się nimi bez wahania.

To, że ciężcy superpartnerzy spowodowaliby nawrót problemów z naturalnością, było głównym powodem, dla którego wielu fizyków wierzyło w rychłe odkrycie nowych cząstek w LHC. „Jeśli SUSY istnieje, wiele z najważniejszych stojących za nią motywacji

wymaga, by niektóre cząstki supersymetryczne znajdowały się w zasięgu skali TeV”[45] – jest to przykładowy cytat pochodzący z serii wykładów Carlosa Wagnera wygłoszonych w 2005 roku w Instytucie Enrica Fermiego w Chicago, który podaję tylko jako próbkę tego, co słyszałam na dziesiątkach seminariów. „Teoretycy kochają SUSY za jej elegancję”, napisał Leon Lederman niedługo przed uruchomieniem Wielkiego Zderzacza Hadronów. „LHC pozwoli nam ustalić, czy SUSY istnieje, czy nie: nawet jeśli skwarki i gluina [dwa rodzaje superpartnerów] mają masy rzędu 2,5 TeV, LHC je znajdzie”[46].

Bozon Higgsa okazał się mieć masę około 125 GeV. Nie odkryto jednak żadnych superpartnerów ani niczego innego, czego model standardowy nie potrafiłby wyjaśnić. To oznacza, że już wiemy, iż jeśli superpartnerzy istnieją, to ich masy muszą być precyzyjnie dostrojone. Wygląda na to, że założenie naturalności po prostu nie jest poprawne.

Niesłuszność argumentów bazujących na naturalności sprawiła, że fizycy cząstek nie wiedzą, co począć. Wygląda na to, że ich najbardziej zaufana zasada przewodnia zawiodła.

∞∞

LHC rozpoczął swój pierwszy kurs w 2008 roku. Gdy piszę te słowa, jest grudzień 2015 roku i jak dotąd nie znaleziono żadnych przejawów supersymetrii, sprzecznie z przewidywaniem Gordy’ego z 2001 roku. Na początku tego roku LHC został uruchomiony ponownie po dwuletniej przebudowie i ulepszeniach i tym razem osiągnął energię 13 TeV, a ponieważ nie znamy jeszcze rezultatów tego drugiego kursu, wciąż jest nadzieja.

W czasie przerwy konferencyjnej znajduję czas, by zapytać Gordy’ego, co sądzi o obecnej sytuacji.

– Co sobie pomyślałeś, gdy w LHC nie natrafiono na superpartnerów?

– Nie było powodów, by pojawili się już w pierwszym kursie – mówi Gordy. – Nie było żadnej motywacji poza naiwnym argumentem z naturalności. A jeśli szukasz teorii, która oferuje przewidywania, to spójrz na teorię strun. Superpartnerzy nie powinni pojawić się w pierwszym kursie. Może pojawią się w drugim.

Tym, czym odznacza się prawdziwy naukowiec, jest umiejętność dostosowania się do nowych danych.

– A co, jeśli w drugim kursie też ich nie będzie?

– Wtedy ten model jest błędny. Nie jestem pewien. Musiałbym się głęboko zastanowić, co jest nie tak. Ponieważ przewidywania tego modelu są tak ogólne, to faktycznie spodziewam się, że odkryjemy superpartnerów. [Jeśli tak się nie stanie,] z pewnością potraktuję te dane poważnie i pomyślę, co dałoby się zmienić w modelu. Nie wiem. Ale w takiej sytuacji chciałbym się przez jakiś czas poprzyglądać i zobaczyć, czy znajdzie się coś, co można by zmienić.

Po kilku pierwszych dniach warsztatów w Monachium stało się dla mnie jasne, że nikt tu nie ma praktycznej rady, co począć. Może zbyt wiele oczekiwałam po filozofach.

Dowiedziałam się za to, że idea Karla Poppera, w myśl której teorie naukowe muszą być falsyfikowalne[15*], jest już od dawna nieaktualna. Miło mi to słyszeć, bo to filozofia, której nikt w nauce nie mógłby nigdy zastosować, chyba że w celach retorycznych. Rzadko da się rzeczywiście sfalsyfikować jakąś ideę, albowiem idee zawsze można zmodyfikować lub rozszerzyć, aby zgodziły się z nowymi danymi. Nie tyle więc falsyfikujemy teorie, ile je „oduwiarygadniamy”: teoria bezustannie modyfikowana staje się coraz trudniejsza i zawiła – by nie powiedzieć: brzydka – i w końcu jej adepci tracą nią zainteresowanie. Jednakże to, kiedy

jakaś idea przestaje być wiarygodna, zależy od czyjejś tolerancji wobec wielokrotnego dopasowywania teorii do sprzecznych z nią danych.

– Czy uważasz – pytam Gordy'ego – że elegancja teorii jest czymś, na co teoretycy zwracają uwagę? I że *powinni* zwracać na nią uwagę?

– Jak najbardziej zwracają – odpowiada. – Ja tak robiłem, bo to daje satysfakcję z pracy i czyni ją ekscytującą. – Na chwilę przerywa. – Waham się powiedzieć, że „powinni". Niby *powinno się* robić to, co dostarcza poczucia satysfakcji. Ale w tym „powinno się" chodzi raczej o to poczucie niż o jakąś logiczną zasadę. Jeśli istnieje lepszy sposób, to ktoś inny powinien go zrealizować. Ale wątpię, że taki sposób istnieje, a ten daje satysfakcję.

W skrócie

- Uczeni kierowali się pięknem od dawna. Nie zawsze był to dobry przewodnik.
- W fizyce teoretycznej bardzo przydatne były symetrie. Obecnie uważa się je za piękne.
- Fizycy cząstek uważają też, że teoria jest piękna, jeśli zawiera wyłącznie „naturalne" liczby – liczby bliskie jedności. Liczbę nienaturalną nazywa się „precyzyjnie dostrojoną" (*fine-tuned*).
- Jeśli brakuje nam danych i do zdecydowania, gdzie ich szukać, potrzebujemy teorii, to każda pomyłka przy jej formułowaniu może wpędzić nas w ślepą uliczkę.
- Niektórzy filozofowie proponują, by osłabić metodę naukową, tak aby naukowcy mogli wybierać teorie za pomocą kryteriów innych niż zgodność z obserwacjami.
- Kwestie tego, jak posuwać się naprzód pomimo braku danych i czy modyfikować metodę naukową, wykraczają poza podstawy fizyki.

Rozdział 3

Stan państwa

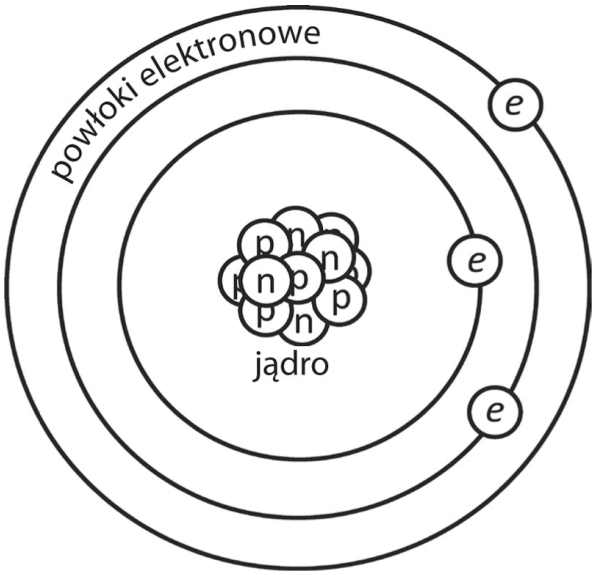
W którym podsumowuję na ponad trzydziestu stronach dziesięć lat edukacji i gawędzę o czasach świetności fizyki cząstek.

Świat według fizyków

Najbardziej zdumiewającym faktem na temat fizyki wysokich energii jest to, że można nic o niej nie wiedzieć.

Weźmy wapń, jedną z substancji obecnych w naszych kościach. Atom wapnia składa się z dwudziestu neutronów i dwudziestu protonów związanych w jądrze otoczonym przez dwadzieścia elektronów. Elektrony są fermionami tworzącymi odrębne powłoki wokół jądra. To właśnie struktura tych powłok determinuje własności chemiczne wapnia.

Ale protony i neutrony nie siedzą w jądrze nieruchomo: są w ciągłym ruchu, przesuwają się i obijają o siebie, emitując i pochłaniając cząstki będące nośnikami wiążących je sił. W świecie subatomowym nigdy nie jest cicho i spokojnie. A jednak, pomimo ciągłej akcji, wszystkie atomy wapnia zachowują się podobnie. I całe szczęście, bo w przeciwnym razie nasze kości mogłyby się rozpaść.



Rysunek 2. Model powłokowy atomu, w którym elektrony (e) znajdują się na odrębnych powłokach otaczających jądro atomowe zbudowane z protonów (p) i neutronów (n). Mamy tu do czynienia z przykładem rozdzielenia skal. To, co dzieje się z cząstkami w jądrze, nie wpływa na powłoki elektronowe i na chemiczne właściwości atomu.

Intuicyjnie wiedzieliśmy o tym przez całe życie: to, co dzieje się z neutronami wewnątrz atomów, nie może być zbyt istotne, bo coś byśmy o tym słyszeli. Ale na poziomie koncepcyjnym ten brak wpływu neutronów jest absolutnie zadziwiający. Dlaczego, biorąc pod uwagę ogromną liczbę części składowych, skomplikowana struktura wewnętrzna atomów nie prowadzi do zachowania, które byłoby znacznie trudniejsze do rozgryzienia? Czemu wszystkie atomy są tak podobne? Każda z wielu cząstek składających się na atomy żyje własnym życiem, a jednak zachowanie tych ostatnich rządzi się stosunkowo prostymi prawami – tak prostymi, że pierwiastki można schludnie zestawić w układ okresowy, bazując wyłącznie na strukturze powłok elektronowych.

Wydaje się, że natura odnosi się wyjątkowo łaskawie do naszego pragnienia rozumienia. Cokolwiek dzieje się w jądrze, pozostaje w jądrze; widzimy tylko efekt wypadkowy. Niektóre atomy wiążą się z wodorem, a inne nie – ale szczegóły procesów

jądrowych nie mają z tym nic wspólnego. Niektóre atomy tworzą regularne, okresowe struktury krystaliczne, a inne nie – lecz to, co dzieje się w jądrze, nie ma żadnego wpływu na te struktury.

Nie tylko w przypadku atomów można przymykać oczy na to, co dokładnie robią ich składniki. Również własności cząstek złożonych, takich jak neutrony i protony, są niemal niezależne od szczegółów ruchu ich składników – kwarków i gluonów. A gdy na przykład opisujemy to, jak atomy popychają ziarna pyłków po powierzchni wody (ruchy Browna), wystarczy traktować same atomy jako punktowe cząstki i po prostu ignorować fakt, iż są zbudowane z czegoś mniejszego. To samo ma miejsce nawet w większych skalach: orbity planet nie zależą od struktury tych ostatnich, a – oddalając się jeszcze bardziej – w skalach kosmologicznych nawet galaktyki można uważać za punkty materialne pozbawione struktury wewnętrznej.

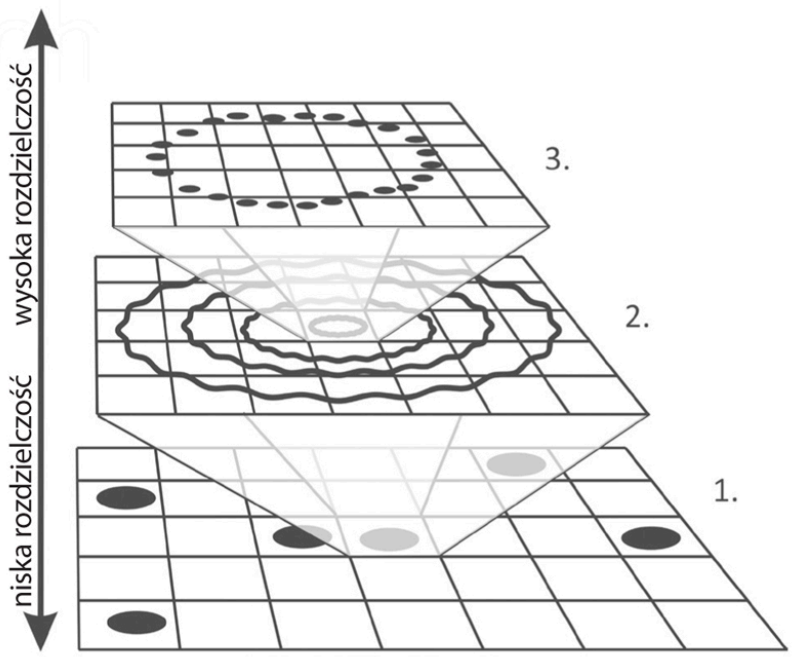
Nie chcę przez to powiedzieć, że to, co dzieje się na małych odległościach, nie wywiera żadnego efektu na to, co dzieje się na większych; chodzi raczej o to, że szczegóły mają tak niewielkie znaczenie. Duże obiekty są zbudowane z mniejszych obiektów, a prawa dotyczące tych pierwszych wynikają z praw obowiązujących dla tych drugich. Co jednak zaskakujące, prawa, które opisują zachowanie większych obiektów, są stosunkowo proste.

Jak się okazuje, większość informacji dotyczących mniejszych obiektów nie jest potrzebna do zrozumienia większych obiektów. Mówimy, że fizyka na małych odległościach „rozprzęga się” (*decouples*) od fizyki na większych odległościach lub też zachodzi „separacja skal”. To dzięki temu zjawisku możemy iść przez życie, nie wiedząc nic ani o kwarkach, ani o bozonie Higgsa, ani nawet – ku przerażeniu profesorów fizyki na całym świecie – o tym, czym jest kwantowa teoria pola.

Separacja skal ma daleko idące konsekwencje. Oznacza, że możemy formułować przybliżone prawa przyrody, które z dobrą dokładnością opisują jakiś układ fizyczny przy zadanej rozdzielczości, a następnie rewidować te prawa, w miarę jak zwiększamy rozdzielczość. Takie zgrubne prawa, działające dobrze tylko na pewnym poziomie rozdzielczości, nazywa się „prawami efektywnymi".

Kiedy zmniejszamy rozdzielczość, warto odpowiednio dostosować obiekty analizowane w danej teorii wraz z przypisywanymi im własnościami. W teorii operującej na niskim poziomie rozdzielczości sensowne może być ujęcie wielu małych składników w jeden większy obiekt, nadanie mu jakiejś nazwy i stosownych cech. W ten sposób możemy mówić o atomach i ich strukturze powłokowej, o cząsteczkach i ich drganiach własnych, a także o metalach i ich przewodności – mimo iż w fundamentalnej teorii nie ma niczego takiego jak atomy, metale czy ich przewodność, są jedynie cząstki elementarne.

A zatem każdy poziom rozdzielczości posiada swój własny język, który dostarcza najbardziej użytecznych sformułowań. Takie zależne od rozdzielczości obiekty wraz z ich własnościami nazywamy „emergentnymi". Przechodzenie z poziomu teorii operującej na małych odległościach na poziom takiej, która działa na większych odległościach, określa się również jako *coarse-graining*, czyli dosłownie „gruboziarnistościowanie" (rysunek 3).



Rysunek 3. Ilustracja *coarse-grainingu*. Obiekty i rządzące nimi prawa na niskim poziomie rozdzielczości (1) dają się opisać w terminach obiektów i praw poziomów średniego (2) i wysokiego (3), ale nie na odwrót. Niskie poziomy rozdzielczości wyłaniają się („emergują”) z poziomów wysokich.

„Emergentne” jest przeciwieństwem „fundamentalnego”, które oznacza, że danego obiektu nie da się już rozłożyć na nic mniejszego, a jego własności nie dają się wyprowadzić z dokładniejszej teorii. Tak rozumiana fundamentalność zależy od bieżącej wiedzy. To, co dziś jest fundamentalne, jutro może już takie nie być. Ale to, co dziś emergentne, pozostanie już na zawsze emergentne[16*].

Materia składa się z cząsteczek, które składają się z atomów, a te z kolei zbudowane są z cząstek modelu standardowego. Te ostatnie wraz z przestrzenią i czasem są, zgodnie z obecną wiedzą, fundamentalne – nie składają się już z niczego innego. W podstawach fizyki usiłujemy dociec, czy nie istnieje coś jeszcze bardziej fundamentalnego.

Jako fizyczka często spotykam się z oskarżeniami o redukcjonizm, tak jakby było to tylko jedno ze stanowisk możliwych do przyjęcia. Ale to nie jest stanowisko filozoficzne – to cecha przyrody ukazana przez eksperymenty. Wyekstrahowaliśmy te poziomy rozdzielczości i rządzące nimi prawa w toku niezliczonych obserwacji, odkrywając, iż opisują one nasz świat wręcz doskonale. Efektywna teoria pola mówi nam, że w zasadzie da się wyprowadzić teorię dla dużych skal z teorii dla małych skal, ale nie na odwrót.

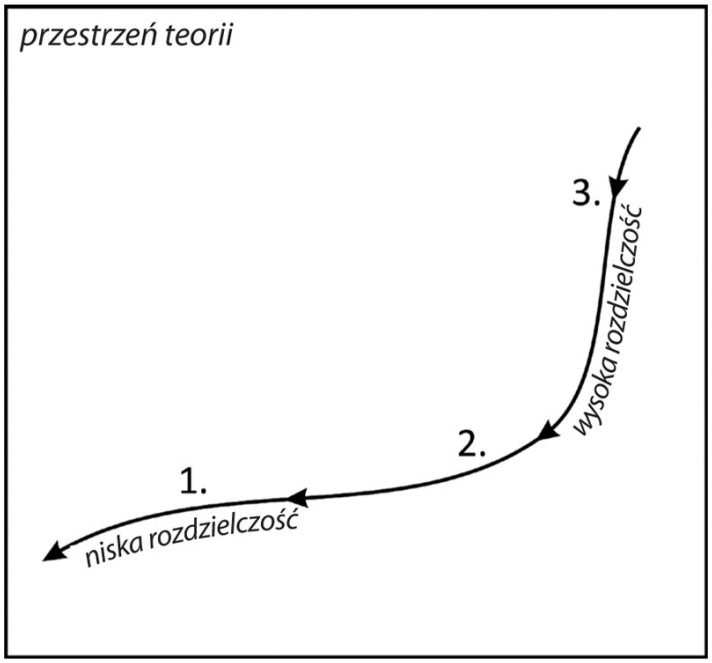
To, że historia nauki stopniowo ukazała tę hierarchiczną strukturę, powoduje, że współcześnie wielu fizyków sądzi, iż musi istnieć pojedyncza, fundamentalna teoria, z której wynika wszystko inne – „teoria wszystkiego". To zrozumiała nadzieja. Gdyby ktoś cierpliwie ssał gigantyczny cukierek typu „łamiszczęka" przez okrągłe stulecie, czyż nie liczyłby na to, że oto wreszcie zbliża się do ukrytego w środku pysznego nadzienia?

Wszystko płynie

Prawa efektywne, które są zależne od rozdzielczości, pozwalają zobaczyć na jeszcze inny sposób, dlaczego naturalność jest atrakcyjna. W tym celu fizycy umiejscawiają każdą teorię w abstrakcyjnej „przestrzeni teorii", która przydaje się, aby zobrazować związki między różnymi teoriami. Ponieważ teorie zależą od rozdzielczości, w miarę zmieniania tej ostatniej zakreślamy pewną krzywą w przestrzeni teorii (rysunek 4). Łącznie krzywe wszystkich teorii nazywa się „przepływem" teorii.

W przestrzeni teorii naturalność oznacza, że teoria na niskiej rozdzielczości nie powinna wykazywać wrażliwej zależności od teorii na wysokiej rozdzielczości (o której zakłada się, że jest bardziej fundamentalna). Idea polega tu na tym, by przy jakimkolwiek wyborze wartości parametrów w bardziej fundamentalnej teorii fizyka na małej rozdzielczości wciąż

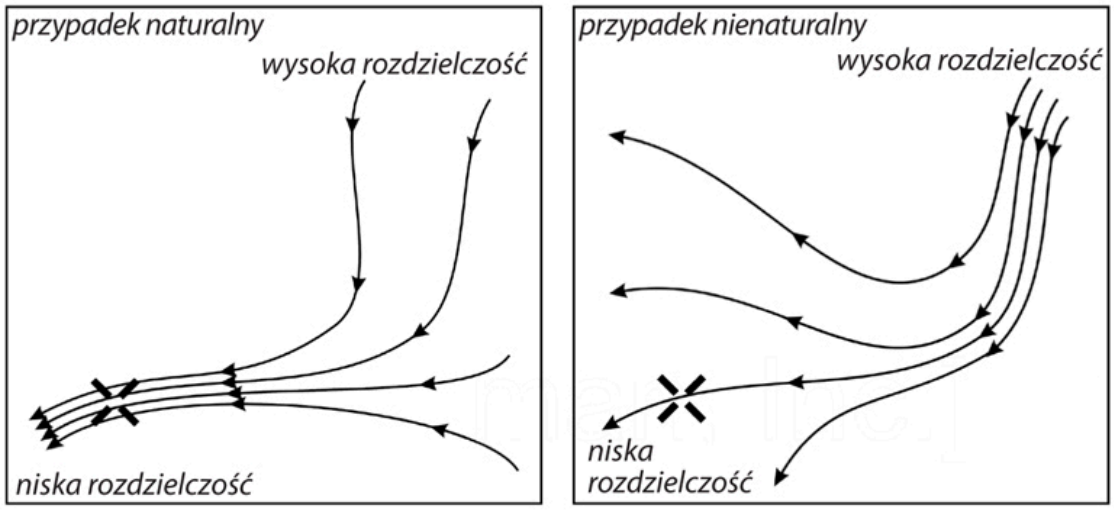
przypominała tę, którą obserwujemy. To właśnie jest pierwotna motywacja stojąca za naturalnością: nasz wybór nie powinien mieć znaczenia.



Rysunek 4. Każdy punkt w przestrzeni teorii reprezentuje inną teorię. Stopniowo zmieniając rozdzielczość, zakreśla się w tej przestrzeni krzywą. Numery odnoszą się do poziomów z rysunku 3.

Pojęcie przepływu w przestrzeni teorii pozwala skwantyfikować, jak bardzo teoria na niskim poziomie rozdzielczości zależy od doboru wartości parametrów na wyższym poziomie; właśnie na tej zasadzie działają miary wprowadzone przez Giudicego[17*]. Zilustrowano to na rysunku 5. Na wykresie tym niska rozdzielczość odnosi się do poziomu, który obecnie jesteśmy w stanie badać eksperymentalnie – to tam znajduje się model standardowy. Może wydawać się dziwne, że nazywamy ją „niską”, skoro jest to najwyższa rozdzielczość, jaką kiedykolwiek osiągnęliśmy! Niemniej *jest* ona niska w porównaniu do tej, która, jak sądzimy, jest konieczna do odkrycia teorii wszystkiego, a która leżeć ma daleko poza zasięgiem LHC.

Model standardowy (niski poziom rozdzielczości) jest naturalny lub nie wymaga dostrojenia, jeśli nie ma większego znaczenia, z którego dokładnie punktu przestrzeni teorii wystartujemy na wysokim poziomie rozdzielczości. W tej sytuacji przepływ zawsze doprowadza nas w pobliże (określone dokładnością pomiarową) modelu standardowego (rysunek 5, lewy panel). Z drugiej strony, jeśli w celu wylądowania w pobliżu modelu standardowego musimy drobiazgowo wybrać teorię na wysokim poziomie rozdzielczości, to mamy do czynienia z precyzyjnym dostrojeniem punktu początkowego. Wówczas model standardowy jest nienaturalny (rysunek 5, prawy panel).



Rysunek 5. Ilustracja przepływu w przestrzeni teorii w przypadku gdy dana teoria (na przykład model standardowy, oznaczony przez X) na niskim poziomie rozdzielczości jest naturalna/niedostrojona (po lewej) oraz gdy jest nienaturalna/precyzyjnie dostrojona (po prawej).

W przypadku z precyzyjnym dostrojeniem punkty początkowe teorii odtwarzających model standardowy (tj. zgodnych z obserwacjami) muszą leżeć blisko siebie. Ta mała odległość przekłada się na nieestetycznie małe liczby omówione przez nas uprzednio, takie jak masa bozonu Higgsa.

W kolejnym podrozdziale podsumuję odkryte przez nas do tej pory prawa rządzące przestrzenią, czasem i materią, a także idee eksperymentów, które nas do nich doprowadziły. Jeśli czytelnik jest zaznajomiony z modelem standardowym cząstek elementarnych oraz ze standardowym modelem kosmologicznym, może pominąć ten fragment.

Narzędzia pracy

W 1858 roku irlandzko-amerykański pisarz Fitz James O'Brien wyobraził sobie mikroskop doskonały. W krótkim opowiadaniu pod tytułem *Diamentowa soczewka* niejaki Linley, szalony mikroskopista, postanawia zasięgnąć rady u ducha Antoniego van Leeuwenhoeka, który dwieście lat wcześniej odkrył bakterie, kiedy pracował nad ulepszeniem pierwszych mikroskopów. Van Leeuwenhoek był znany z tego, że przez całe życie trzymał w tajemnicy swoje metody produkcji soczewek. Z pomocą medium – o pseudonimie Madame Vulpes – Linley dowiaduje się od zmarłego van Leeuwenhoeka, że potrzebuje „140-karatowego diamentu poddanego przez dłuższy czas działaniu prądów elektromagnetycznych", aby skonstruować mikroskop, którego „siłę powiększania ograniczałyby tylko cechy rozdzielcze obiektu".

Ponieważ Linley nie posiada wystarczających środków na badania, zabija swojego przyjaciela i kradnie potrzebny diament. Później spogląda do wnętrza kropli wody[18*]:

> Przyznaję, że nie potrafię pokusić się o pełne opisanie uroków tego boskiego objawienia ideału piękności. Wymyka się słowom tajemny fiolet tych oczu, wilgotnych a pogodnych. Długie lśniące włosy, które złocistym welonem spływały z jej prześlicznej głowy jak haftowany na niebie szlak spadającej gwiazdy, gasiły swoim przepychem moje najbardziej płomienne zwroty[1].

Nie wiadomo, czy przyroda na najmniejszych odległościach okaże się tak piękna, jak wyobrażał sobie O'Brien, ale wiemy już, że jego doskonały mikroskop pozostanie w sferze fikcji. Zdolność rozdzielcza soczewek zależy od nośnika, na którym opiera się ich działanie – od światła. Długie fale nie są czułe na małe odległości, na podobnej zasadzie jak ciężkie buty nie są w stanie wyczuć rowków na powierzchni ruchomych schodów. Rozdzielczość mikroskopów jest ograniczona długością fali używanego światła – i aby dostrzec coś na krótszych odległościach, potrzeba krótszych fal.

Światło widzialne odpowiada długościom fali od około 400 do 700 nanometrów[19*]. To jakieś 10 000 razy więcej niż rozmiar atomu wodoru. A zatem światło widzialne sprawdza się dobrze, jeśli chcemy badać komórki, ale jest już niewystarczające do studiowania atomów. Można osiągnąć lepszą rozdzielczość, używając krótszych fal świetlnych, takich jak promienie rentgenowskie – dzięki temu uzyskuje się poprawę o czynnik od 100 do 10 000. Jednak światło o jeszcze krótszych falach coraz trudniej ukierunkowywać i skupiać.

W celu dalszego poprawiania rozdzielczości należy zatem skorzystać z głównej lekcji płynącej z mechaniki kwantowej: tak naprawdę nie ma ani czegoś takiego jak fale, ani czegoś takiego jak cząstki. Zamiast tego wszystko we wszechświecie (o ile wiemy, włącznie z samym wszechświatem) opisane jest funkcją falową, która ma właściwości zarówno cząstek, jak i fal. Czasami funkcja falowa jawi się bardziej jako fala, a czasami bardziej jako cząstka. Ale zasadniczo nie jest żadną z nich – stanowi nową, odrębną kategorię bytu.

Ściśle rzecz biorąc, nie należałoby zatem w ogóle mówić o „cząstkach elementarnych", ale raczej, jak zasugerował jeden z moich profesorów, powinniśmy nazywać je „elementarnymi cosiami". Nikt jednak nie używa takiego wyrażenia i ja również nie

chcę torturować nim czytelnika. Wystarczy pamiętać, że ilekroć fizycy mówią o cząstkach, w rzeczywistości mają na myśli obiekt matematyczny zwany funkcją falową, który nie jest ani cząstką, ani falą, lecz posiada cechy obu.

Sama funkcja falowa nie odpowiada żadnej obserwowalnej wielkości, ale na podstawie jej wartości bezwzględnej można obliczać prawdopodobieństwa dla pomiarów fizycznych obserwabli. To najlepsze, co da się osiągnąć w ramach teorii kwantowej – z wyjątkiem szczególnych okoliczności wynik pojedynczego pomiaru jest nieprzewidywalny.

Teoria kwantowa pomaga nam poprawić zdolność rozdzielczą mikroskopów, ponieważ ujawnia, że im cięższa jest jakaś cząstka („jakieś coś”?) i im szybciej się porusza, tym mniejsza jest jej długość fali. Dlatego właśnie mikroskopy elektronowe, w których zamiast światła stosuje się wiązki elektronów, osiągają znacznie wyższe rozdzielczości niż mikroskopy optyczne. Nawet jeśli elektrony poruszają się z umiarkowaną prędkością, mikroskopy takie, posługując się polem elektrycznym i magnetycznym, są w stanie dostrzec struktury tak małe jak atom. W zasadzie możemy dowolnie zwiększać ich rozdzielczość poprzez rozpędzanie elektronów do coraz wyższych prędkości. Jest to podstawowy powód, dla którego współczesna fizyka napędza – i jest napędzana przez – budowanie coraz potężniejszych akceleratorów cząstek: większa energia zderzeń przekłada się na większą zdolność rozdzielczą.

Inaczej niż w mikroskopach optycznych, w których stosuje się zwierciadła i soczewki, w akceleratorach do przyspieszania i skupiania wiązek elektrycznie naładowanych cząstek wykorzystuje się pola elektryczne i magnetyczne. Jednakże im bardziej rozpędzone są cząstki służące do badań jakiegoś obiektu, tym trudniej jest wydobyć informacje z pomiaru. Wynika to stąd, że cząstki, które miały jedynie nieznacznie oddziaływać z próbką,

zaczynają w istotny sposób na nią wpływać. Gdy światło widzialne pada na kawałek cebuli, nie dzieje się nic, być może poza niewielkim ogrzaniem cebuli. Ale gdy rozpędzona wiązka elektronów trafia w płytkę-tarczę w akceleratorze, ta ostatnia przy dostatecznie wysokiej energii wiązki ulegnie zniszczeniu. Informację o tym, co stało się na bardzo krótkich odległościach, trzeba wówczas jakoś wydobyć ze zgliszczy. Zasadniczo na tym właśnie polega fizyka wysokich energii: na próbie wydobycia informacji z pozostałości po zderzeniach[20*].

Rozdzielczość, którą można osiągnąć za pomocą akceleratorów, jest odwrotnie proporcjonalna do całkowitej energii zderzających się cząstek. Wygodnym do zapamiętania faktem jest to, że energia 1 GeV (czyli 10^9 eV lub 10^{-3} TeV, równa mniej więcej masie protonu) odpowiada zdolności rozdzielczej około 1 femtometra (10^{-15} m, mniej więcej rozmiar protonu). Chcąc zmniejszyć tę odległość dziesięciokrotnie, należy dziesięciokrotnie zwiększyć energię i *vice versa*. Wielki Zderzacz Hadronów został zaprojektowany do osiągnięcia maksymalnej energii zderzeń równej około 10 TeV. Przekłada się to na zdolność rozdzielczą około 10^{-19} m, co jest najmniejszą odległością, na której udało nam się jak dotąd przetestować prawa przyrody.

Zadaniem fizyków teoretycznych jest znaleźć równania, które trafnie opisują rezultaty zderzeń cząstek. Kiedy obliczenia zgadzają się z danymi eksperymentalnymi, nabieramy pewności co do teorii. Kiedy fizycy teoretyczni lepiej rozumieją zderzenia cząstek, doświadczalnicy mogą projektować doskonalsze detektory. A kiedy doświadczalnicy lepiej rozumieją technikę akceleratorową, teoretycy otrzymują dokładniejsze dane.

Taka strategia okazała się niesamowicie skuteczna i zaowocowała sformułowaniem modelu standardowego cząstek elementarnych, obecnie najlepszej syntezie naszej wiedzy o podstawowych cegiełkach materii.

Model standardowy opiera się na zasadzie znanej jako „symetria cechowania”. Zgodnie z tą zasadą każda cząstka posiada kierunek w przestrzeni wewnętrznej, niczym igła kompasu, przy czym w kierunku wskazywanym przez cząstkę-igłę nie da się patrzeć.

Czym, do diaska, jest przestrzeń wewnętrzna? – można by spytać. Dobre pytanie. Najlepsza odpowiedź, jaką znam, brzmi: czymś użytecznym. Jest to nasz pomysł na ilościowy opis obserwowanego zachowania cząstek, matematyczne narzędzie służące do formułowania przewidywań.

No tak, ale czy jest ona rzeczywista? – chciałoby się wiedzieć. Ojoj. Zależy, kogo spytać. Niektórzy moi koledzy faktycznie wierzą, że obiekty matematyczne w naszych teoriach, takie jak przestrzenie wewnętrzne, są rzeczywiste. Osobiście wolę mówić jedynie, że opisują rzeczywistość, pozostawiając otwartą kwestię, czy same te obiekty istnieją naprawdę. To, jak matematyka wiąże się z rzeczywistością, jest tajemnicą, która prześladowała filozofów na długo przed pojawieniem się naukowców, i dziś wcale nie jesteśmy mądrzejsi. Na szczęście możemy używać matematyki bez rozwikłania tej tajemnicy.

A zatem każda cząstka posiada kierunek w takiej użytecznej przestrzeni wewnętrznej. Pod nazwą „symetria cechowania” kryje się wymóg, by prawa przyrody nie zależały od etykiet, których używamy w opisie tej przestrzeni – podobnie jak moglibyśmy obrócić kompas tak, by igła wskazywała na nim północny zachód zamiast północy. W wyniku takiej zmiany cząstka „północna” zmieniłaby się w kombinację innych cząstek, stając się, dajmy na to, cząstką „północno-zachodnią”. Coś takiego rzeczywiście dzieje się z elektronem: przekształcenie dokonane w jego przestrzeni wewnętrznej może zmienić elektron w mieszaninę elektronu i neutrina. Jeśli jednak przekształcenie to jest symetrią, to wówczas takie wymieszanie się cząstek nie powinno zmienić

fizyki. A zatem wymóg symetrii nakłada ograniczenia na prawa, które możemy zapisać. Działa tu podobna logika jak przy kolorowaniu mandali. Jeśli użyte barwy mają respektować symetrię projektu, liczba opcji jest mniejsza, niż gdyby ją ignorować.

W przypadku praw przyrody nie jest łatwo sprostać wymogom symetrii. Sporą komplikacją jest to, że przekształcenia przestrzeni wewnętrznej mogą się zmieniać w kolejnych chwilach, a także mogą być inne w różnych miejscach, i również to nie powinno wpływać na prawa rządzące cząstkami. Jeśli wyrazimy ów wymóg symetrii w formie matematycznej, to okaże się, że całkowicie determinuje on zachowanie cząstek. Oddziaływanie między nimi musi następować za pośrednictwem kolejnej cząstki, której własności są wyznaczone przez zadany typ symetrii. Tę dodatkową cząstkę nazywa się bozonem cechowania danej symetrii.

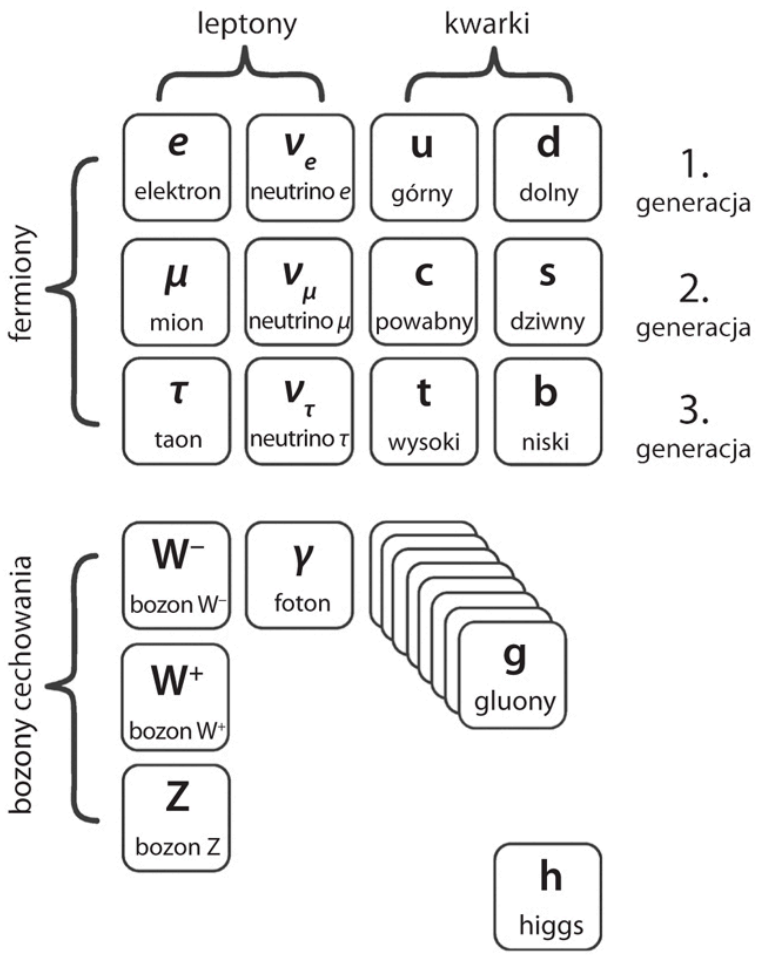
Poprzedni akapit krótko streszcza wyprowadzenie naszpikowane matematyką i jako taki daje tylko zgrubne wrażenie, jak to działa. Ale wynik jest taki, że skonstruowanie teorii z pewną symetrią (cechowania) nieodzownie prowadzi do specyficznego typu oddziaływania między cząstkami respektującymi tę symetrię. Co więcej, wymóg symetrii automatycznie wprowadza bozony cechowania przenoszące oddziaływanie stanowiące integralną część teorii. To właśnie na tego typu symetrii cechowania opiera się model standardowy.

Co godne uwagi, model standardowy niemal w całości operuje na takich zasadach symetrii. Łączy oddziaływanie elektromagnetyczne z oddziaływaniem silnym (odpowiedzialnym za utrzymywanie w całości jąder atomowych na przekór odpychaniu elektrycznemu) i z oddziaływaniem słabym (odpowiedzialnym za rozpad jądrowy). Tym trzem oddziaływaniom odpowiadają trzy symetrie cechowania, a wszystkie cząstki

klasyfikuje się na podstawie tego, jak działają na nie poszczególne symetrie. (Co prawda wspominałam, że ważniejsza od cząstek jest dla nas ogólna idea, ale ponieważ to cząstki są mierzone w eksperymentach, załączam krótkie podsumowanie modelu standardowego w Dodatku A oraz przeglądową tabelkę cząstek na rysunku 6).

Model standardowy jest wykwintnym dziełem abstrakcyjnej matematyki, kwantową teorią pola z symetriami cechowania. Kiedyś sądziłam, że brzmi to uczenie. Zauważyłam jednak, że niezrozumiałość niekiedy budzi podejrzenia. Jak możemy być tak pewni, że wszystko jest zbudowane z ledwie dwudziestu pięciu cząstek, skoro większości z nich nie możemy zobaczyć?

Odpowiedź jest stosunkowo prosta. Używamy całej tej matematyki, aby obliczyć rezultaty eksperymentów, i obliczenia te poprawnie opisują to, co obserwujemy. W ten sposób wiemy, że teoria działa. W rzeczy samej takie jest znaczenie samego stwierdzenia „teoria działa”. Owszem, jest abstrakcyjna, ale to, że widzimy jedynie odczyty z detektorów, a nie same cząstki, jest nieistotną niedogodnością. Jedyną istotną rzeczą jest to, że matematyka daje dobry wynik.



Rysunek 6. Model standardowy fizyki cząstek.

Model standardowy jest przykładem kwantowej teorii pola. Brzmi to straszniej, niż jest w rzeczywistości. Pole to coś, to przyporządkowuje jakąś wartość do każdego punktu w przestrzeni i do każdej chwili w czasie. Na przykład siła sygnału telefonu komórkowego zadaje pewne pole. Kiedy określamy jakieś pole jako pole kwantowe, mamy na myśli, że opisuje ono obecność cząstek, które – jak widzieliśmy wcześniej – są obiektami kwantowymi. Samo pole kwantowe mówi nam, jak prawdopodobne jest znalezienie pewnej cząstki w danym miejscu i czasie. Z kolei równania kwantowej teorii pola mówią nam, jak to obliczyć.

Oprócz symetrii cechowania model standardowy wykorzystuje także symetrie ujawnione przez Alberta Einsteina w jego szczególnej teorii względności. Według Einsteina trzy wymiary przestrzeni oraz pojedynczy wymiar czasu muszą zostać połączone w czterowymiarową czasoprzestrzeń, przy czym przestrzeń i czas muszą być traktowane na równi. A zatem prawa przyrody: (1) muszą być niezależne od miejsca i czasu, w których je mierzymy, (2) nie mogą się zmieniać wskutek obrotów w przestrzeni oraz (3) nie mogą się zmieniać wskutek uogólnionych obrotów mieszających ze sobą przestrzeń i czas.

Obrót czasoprzestrzenny brzmi niestrawnie, ale chodzi tu po prostu o zmianę prędkości. To dlatego książki popularnonaukowe o szczególnej teorii względności często są pełne rakiet i satelitów mijających się nawzajem. Ale to wszystko to tak naprawdę zbędna dekoracja. Szczególna teoria względności wynika z trzech wymienionych powyżej symetrii i nie potrzeba żadnych bliźniaków w statkach kosmicznych, zegarów laserowych i całej reszty. Wynika z nich również to, że wszyscy obserwatorzy zgadzają się co do szybkości poruszania się cząstek bezmasowych (takich jak fotony, nośniki światła) oraz że nic nie może przekroczyć tej szybkości. Innymi słowy, płynie stąd wniosek, że nic nie porusza się szybciej niż światło[21*].

Symetrie cechowania wraz z symetriami szczególnej teorii względności dyktują większą część struktury modelu standardowego, niemniej posiada on pewne cechy, których nie jesteśmy w stanie (póki co?) wytłumaczyć symetriami. Taką cechą jest przykładowo istnienie trzech generacji fermionów, to jest trzech zestawów podobnych cząstek o coraz wyższych masach (pierwsza generacja zawiera najlżejsze fermiony, a trzecia najcięższe; druga jest gdzieś pomiędzy). Inną niewyjaśnioną cechą jest to, że każdy typ fermionu występuje w dwóch odmianach stanowiących swoje lustrzane odbicia, zwanych

lewoskrętną i prawoskrętną – z wyjątkiem neutrin, których wersji prawoskrętnej nikt nigdy nie widział. Ale o tym, co jest nie tak z modelem standardowym, będziemy mówić więcej w rozdziale 4.

Rozwój modelu standardowego został zapoczątkowany w latach sześćdziesiątych XX wieku i został w znacznej mierze ukończony w późnych latach siedemdziesiątych. Poza fermionami i bozonami cechowania zawiera on jeszcze tylko jedną cząstkę: bozon Higgsa, który nadaje masę pozostałym cząstkom elementarnym[2]. Model standardowy działa i bez bozonu Higgsa; po prostu nie opisuje wtedy rzeczywistości, gdyż wszystkie cząstki są wówczas bezmasowe. W związku z tym Sheldon Glashow nazwał kiedyś bozon Higgsa uroczo „spłukiwaną toaletą" modelu standardowego – wynaleziono go w konkretnym celu, a nie dlatego, że jest ładny[3].

Bozon Higgsa, zaproponowany niezależnie przez kilku badaczy we wczesnych latach sześćdziesiątych, był ostatnią odkrytą cząstką fundamentalną (jego detekcja nastąpiła w 2012 roku), choć nie ostatnią przewidzianą. Tymi były – przewidziane w 1973 roku – kwarki wysoki i niski, których istnienie potwierdzono doświadczalnie odpowiednio w latach 1995 oraz 1977. Pod koniec lat dziewięćdziesiątych dodano do modelu masę neutrin – których teoria sięga lat pięćdziesiątych – po tym, jak eksperymenty wykazały, że są to cząstki masywne. Jednakże od roku 1973 nie wysunięto żadnego nowego trafnego przewidywania, które wykroczyłoby poza model standardowy.

∞∞

Model standardowy stanowi obecnie naszą najlepszą odpowiedź na pytanie, z czego jesteśmy zbudowani. Ale nie uwzględnia grawitacji. Jest tak dlatego, że fizycy cząstek nie muszą brać jej pod uwagę przy formułowaniu przewidywań dla eksperymentów w akceleratorach: masy poszczególnych cząstek elementarnych są

znikome i to samo można powiedzieć o wytwarzanej przez nie sile ciężkości. Grawitacja dominuje na dużych dystansach, ale na krótkich odległościach badanych za pomocą zderzeń cząstek jest ona pomijalnie, wręcz niemierzalnie mała. Z drugiej strony, podczas gdy wszystkie inne oddziaływania mogą się znosić – i tak się istotnie dzieje – zjawisko to nie dotyczy grawitacji. W przypadku dużych obiektów pozostałe oddziaływania neutralizują się i przestają być zauważalne, natomiast siły grawitacji sumują się i stają się istotne.

Grawitacja wyróżnia się również tym, że według naszych obecnych teorii jest ona jedynym (fundamentalnym) oddziaływaniem nieposiadającym własności kwantowych; jest nieskwantowanym – czyli tak zwanym klasycznym – oddziaływaniem. W rozdziale 7 przekonamy się, z jakimi wiąże się to problemami, ale najpierw pozwolę sobie opowiedzieć, co wiemy na temat grawitacji i jak się tego dowiedzieliśmy.

Podczas gdy fizycy cząstek budowali coraz potężniejsze zderzacze, aby przyglądać się coraz mniejszym odległościom, astronomowie budowali coraz potężniejsze teleskopy, aby przyglądać się odległościom coraz większym[4]. Pierwsze teleskopy powstawały równolegle do pierwszych mikroskopów, ale konstrukcja tych urządzeń szybko uległa specjalizacji. I również w tej dziedzinie teoria i eksperyment rozwijały się ramię w ramię.

Ponieważ z odległych gwiazd dociera do nas bardzo niewiele światła, astronomowie konstruowali teleskopy o większych aperturach lub większych lustrach, aby zbierać go możliwie jak najwięcej. Ta metoda szybko osiągnęła swoje granice, albowiem ogromne urządzenia stawały się zupełnie niepraktyczne. Zasady gry zmieniły się diametralnie w połowie XIX wieku za sprawą wynalezienia klisz fotograficznych. Odtąd astronomowie mogli zbierać światło, stosując długi czas naświetlania. Ponieważ jednak Ziemia się porusza, długi czas naświetlania prowadziłby do

rozmywania się obrazów w świetlne smugi, chyba że teleskop miałby wbudowany mechanizm kompensujący ten efekt, co z kolei wymagało wiedzy o tym ruchu. A zatem im więcej astronomowie dowiadywali się o nocnym niebie, tym lepsi stawali się w jego obserwowaniu.

Dzisiaj badacze nie utrwalają już obrazów nieba na kliszach fotograficznych, lecz na matrycach CCD – elektronicznych sercach aparatów cyfrowych. Nowoczesne teleskopy są tak czułe, że potrafią rejestrować pojedyncze fotony, a czas naświetlania niekiedy osiąga miliony sekund (ponad tydzień)[5]. No i oczywiście teleskopy wciąż stają się coraz większe: dysponujemy obecnie potężnymi maszynami obracającymi ogromne lustra, które same są regulowane tysiącami małych silniczków celem niwelowania deformacji spowodowanych ciążeniem i zmianami temperatury. Superkomputery i niezwykle dokładne pomiary czasu umożliwiły odległym instrumentom działanie w zespole, co efektywnie daje jeszcze większe, „wirtualne" teleskopy. Aby radzić sobie z fluktuacjami atmosferycznymi rozmywającymi obraz, astronomowie stosują obecnie „optykę adaptatywną" – algorytm komputerowy, który dodatkowo koryguje teleskopy w odpowiedzi na efekty atmosferyczne. Inny sposób całkowitego uniknięcia zniekształceń polega na umieszczeniu teleskopów na pokładzie satelitów i wystrzeleniu ich w przestrzeń kosmiczną.

Rozszerzyliśmy nasze pole widzenia poza światło widzialne, zarówno na fale dłuższe – na widma podczerwieni, mikrofal i fal radiowych – jak i na fale krótsze, wchodząc w domenę promieni rentgenowskich i gamma. Światło nie jest zresztą jedynym nośnikiem wykorzystywanym przez nas obecnie w badaniach kosmosu. Także inne cząstki, wliczając neutrina, elektrony i protony, opowiadają nam o miejscach, z których przybyły, i o tym, co się działo podczas ich podróży ku Ziemi. Najnowszym osiągnięciem astronomów na tym polu jest pierwsza bezpośrednia

detekcja fal grawitacyjnych, które stanowią zaburzenia samej czasoprzestrzeni. Fale te niosą informacje o gwałtownych wydarzeniach, które je zrodziły, takich jak zlewające się czarne dziury.

Łącząc te metody, astronomowie byli w stanie spojrzeć w przeszłość, do czasów gdy wszechświat miał zaledwie 300 000 lat, a także w dal, na odległość jakichś 10 miliardów lat świetlnych. Zebrane dane są diametralnie różne od tych rodem ze zderzaczy. Ale dla nas, teoretyków, zadanie brzmi tak samo: wyjaśnić pomiary.

Standardowy model kosmologiczny

Najlepsze współczesne wyjaśnienie pomiarów dokonanych przez astronomów nazywa się „standardowym modelem kosmologicznym”[22*]. Model ten wykorzystuje matematyczny formalizm ogólnej teorii względności, zgodnie z którym zamieszkujemy trzy wymiary przestrzenne i jeden czasowy, a ponadto nasza czasoprzestrzeń jest zakrzywiona.

Wiem, trudno wyobrazić sobie zakrzywioną czterowymiarową czasoprzestrzeń – nie tylko czytelnik może mieć z tym problem. Na szczęście dwuwymiarowe powierzchnie w wielu przypadkach stanowią wystarczająco dobre analogie. Szczególna teoria względności traktuje czasoprzestrzeń jak płaską kartkę papieru. Natomiast w ogólnej teorii względności może ona posiadać góry i doliny.

Pozostając w obrębie tej analogii, rozważmy mapę górskiego krajobrazu niepokazującą wysokości – wijące się serpentyny dróg będą na niej wyglądały dziwacznie. Ale jeśli wiemy, że są tam góry, można zrozumieć, dlaczego drogi tak przebiegają – w takim terenie to najlepsze, co mogą robić. Fakt, że nie widzimy krzywizny czasoprzestrzeni, jest jak dysponowanie mapą bez poziomic. Gdybyśmy mogli tę krzywiznę zobaczyć,

rozumielibyśmy, że planety zachowują się najzupełniej rozsądnie, krążąc wokół Słońca po orbitach. To najlepsze, co mogą robić.

Ogólna teoria względności opiera się na tych samych symetriach co jej szczególna wersja. Różnica jest taka, że w ogólnej teorii względności czasoprzestrzeń staje się aktywna; reaguje na energię i materię, zakrzywiając się. Z drugiej strony, ruch energii i materii zależy od tego zakrzywienia.

Ale zakrzywienie nie zmienia się tylko z miejsca na miejsce; zmienia się również w czasie. Najważniejszą nauką płynącą z ogólnej teorii względności jest więc fakt, iż wszechświat nie jest niezmienny na wieki. Rozszerza się w reakcji na materię, a wraz z tą ekspansją rozkład materii staje się coraz rzadszy.

Rozszerzanie się wszechświata oznacza, że w przeszłości materia musiała być ciasno ściśnięta. Wczesny wszechświat musiał być zatem wypełniony bardzo gęstą, a przy tym niemal jednorodną zupą cząstek. Zupa ta była także gorąca, co oznacza tyle, że średnia energia poszczególnych zderzeń cząstek była wysoka. Tu pojawia się problem, albowiem przy temperaturach przekraczających z grubsza 10^{17} kelwinów średnia energia zderzeń jest większa od tej osiąganej obecnie w LHC[6]. Dla wyższych temperatur – czyli dla młodszego wszechświata – nie dysponujemy wiarygodną wiedzą na temat zachowania się materii. Snujemy, rzecz jasna, spekulacje i o niektórych z nich opowiemy w rozdziałach 5 i 9. Póki co jednak skoncentrujmy się na tym, co dzieje się poniżej tej temperatury, a co wyjaśnia standardowy model kosmologiczny.

Ogólna teoria względności daje nam równania, które wiążą ekspansję wszechświata z typami zawartych w nim energii i materii. Kosmologowie są zatem w stanie ustalić, co znajduje się we wszechświecie, sprawdzając różne kombinacje materii i energii oraz przyglądając się, która radzi sobie najlepiej z wyjaśnianiem obserwacji (a raczej zlecając to zadanie komputerom). Robią to za

każdym razem, gdy napływają nowe obserwacje. Jakież niespodzianki na nich czekały!

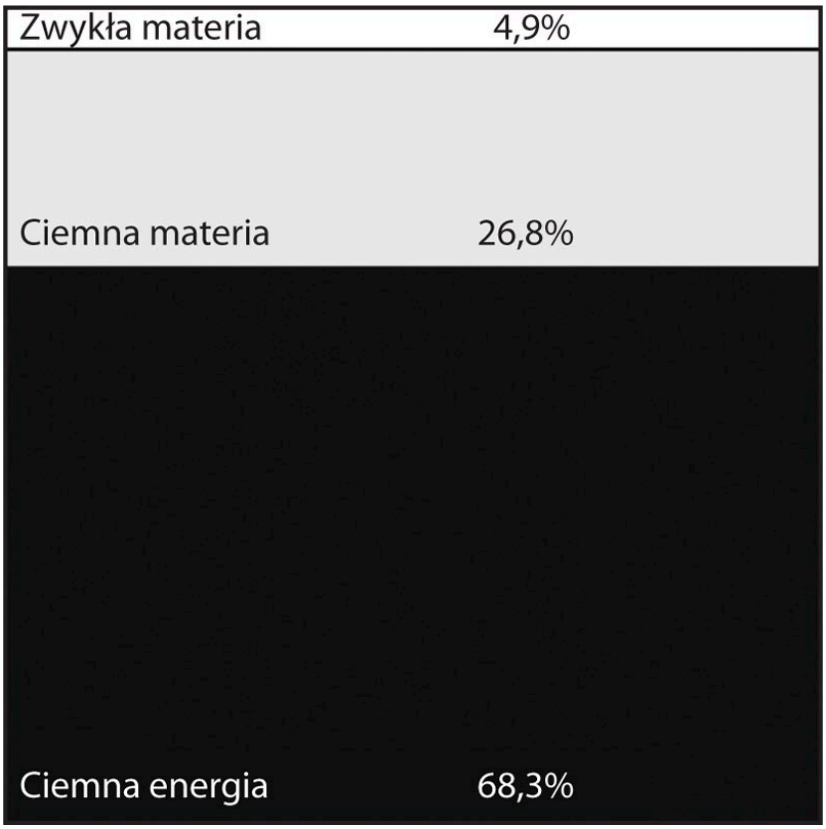
Najbardziej szokującym odkryciem było to, że dominującym obecnie źródłem grawitacji we wszechświecie jest coś, z czym nigdy wcześniej się nie zetknęliśmy. To nieznany typ energii – nazwany ciemną energią – stanowiący aż 68,3 procent w całkowitym bilansie materio-energii. Nie wiemy, czy ciemna energia ma jakąś wewnętrzną strukturę na poziomie mikro; znamy tylko wywierany przez nią efekt. Odpowiada za przyspieszającą ekspansję wszechświata. To dlatego potrzebujemy jej aż tyle, albowiem z danych wynika, że rozszerzanie się wszechświata jest coraz szybsze. Jednakże rozkład ciemnej energii jest też bardzo rzadki, przez co nie jesteśmy jej w stanie zmierzyć w naszym bezpośrednim otoczeniu. Dopiero na dużych odległościach dostrzegamy jej łączny efekt pod postacią przyspieszenia ekspansji.

Najprostszym typem ciemnej energii jest stała kosmologiczna, która nie posiada żadnej wewnętrznej struktury i jest stała zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. W ramach standardowego modelu kosmologicznego to właśnie ona gra rolę ciemnej energii, aczkolwiek ta ostatnia może być czymś bardziej skomplikowanym.

Pozostałe 31,7 procent zawartości wszechświata to materia, ale – kolejna niespodzianka – w większości jest to materia nieznanego nam rodzaju. W 85 procentach (26,8 procent w całkowitym bilansie materio-energii) jest to tak zwana ciemna materia. Wiemy o niej jedynie to, że rzadko wchodzi w interakcje, zarówno ze sobą, jak i z resztą materii. W szczególności nie oddziałuje ze światłem – i stąd jej nazwa. Niektóre cząstki supersymetryczne zachowują się tak, jak powinna się zachowywać ciemna materia, ale nie wiemy jeszcze, czy to właściwe wytłumaczenie.

Pozostałe 15 procent materii we wszechświecie (4,9 procent w całkowitym bilansie materio-energii) to stabilne cząstki modelu standardowego – takie jak te, z których jesteśmy zbudowani (rysunek 7).

Gdy już wiemy, jakie typy energii i materii wypełniają wszechświat, możemy zrekonstruować jego przeszłość. We wczesnym wszechświecie ciemnej energii (w formie stałej kosmologicznej) było pomijalnie mało w porównaniu do materii. Wynika to stąd, że gęstość materii spada wraz z rozszerzaniem się wszechświata, podczas gdy stała kosmologiczna pozostaje, cóż, stała.



Rysunek 7. Bilans materio-energii we wszechświecie dla tych, którzy nie lubią wykresów kołowych.

Jeśli więc dziś ich zawartość jest porównywalna, w stosunku z grubsza 2 : 1, to we wczesnym wszechświecie gęstość materii

musiała znacznie przewyższać gęstość energii stałej kosmologicznej.

A zatem przy temperaturze 10^{17} kelwinów mamy na starcie zupę złożoną niemal wyłącznie ze zwykłej i ciemnej materii. Czasoprzestrzeń reaguje na tę materię i zaczyna się rozszerzać. To ochładza zupę i umożliwia utworzenie się pierwszych jąder atomowych, a następnie lekkich atomów. Początkowo zupa cząstek jest tak gęsta, że światło jest w niej uwięzione. Odkąd jednak formują się atomy, światło może podróżować niemal bez zakłóceń.

Ponieważ ciemna materia nie oddziałuje ze światłem, ochładza się szybciej od zwykłej materii. A zatem we wczesnym wszechświecie to właśnie ona jako pierwsza zaczyna skupiać się w lokalne zagęszczenia pod wpływem swojej własnej grawitacji. Okazuje się, że bez tego wczesnego skupiania się ciemnej materii galaktyki nie uformowałyby się tak, jak to obserwujemy, albowiem przyciąganie grawitacyjne zagęszczeń ciemnej materii jest niezbędne, aby przyspieszyć grupowanie się zwykłej materii. Dopiero po nagromadzeniu się dostatecznie dużej ilości zwykłej materii może rozpocząć się synteza większych jąder atomowych we wnętrzach gwiazd.

Pod działaniem grawitacji w ciągu miliardów lat formują się galaktyki, powstają układy słoneczne, rozbłyskują gwiazdy. Aż do tej chwili wszechświat się rozszerzał, ale jego ekspansja zaczęła spowalniać. Jednak mniej więcej w czasie, gdy galaktyki są już w pełni uformowane, ciemna energia zaczyna przeważać i tempo ekspansji przyspiesza. To właśnie w tym okresie obecnie żyjemy. Odtąd im dalej w przyszłość, tym większemu rozrzedzeniu będzie ulegać materia. A zatem, jeśli ciemna energia ma charakter stałej kosmologicznej, będzie dominować już zawsze, a wszechświat będzie się rozszerzać coraz szybciej – po wsze czasy.

Długość fali pierwszego światła, które wyzwoliło się z zupy cząstek u zarania kosmosu, uległa rozciągnięciu w wyniku ekspansji wszechświata, ale samo światło można wciąż dostrzec. Jego długość fali wynosi obecnie kilka milimetrów, co lokuje je daleko poza zakresem optycznym, w zakresie mikrofalowym. To kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła (*cosmic microwave background*, CMB) jest mierzalne i stanowi dla kosmologów najcenniejsze źródło informacji.

Średnia temperatura CMB wynosi około 2,7 kelwina, niewiele powyżej zera absolutnego. Wokół tej średniej temperatury występują jednak drobne wahania, rzędu 0,003 procent jej wartości. Te wahania pochodzą z obszarów, które były nieco gorętsze lub chłodniejsze od średniej we wczesnym wszechświecie. A zatem fluktuacje w temperaturze CMB stanowią zapis fluktuacji w gorącej zupie, które stały się zaczątkami galaktyk.

Uzbrojeni w tę wiedzę, możemy posłużyć się kosmicznym mikrofalowym promieniowaniem tła w celu odczytania historii wszechświata, jak to opisałam powyżej. Dalsze dane pochodzą z obserwowanego rozkładu galaktyk, różnorakich pomiarów rozszerzania się wszechświata, częstości występowania pierwiastków chemicznych oraz soczewkowania grawitacyjnego, by wymienić tylko najważniejsze źródła[7].

Standardowy model kosmologiczny określa się też skrótowcem ΛCDM, gdzie Λ (grecka wielka litera lambda) oznacza stałą kosmologiczną, a CDM odnosi się do „zimnej ciemnej materii” (*cold dark matter*). Model standardowy cząstek elementarnych razem z modelem ΛCDM współcześnie konstytuują podstawy fizyki[8].

Teraz będzie trudno

Kiedyś brałam udział w cyklu międzynarodowych konferencji *Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions* [Supersymetria i unifikacja oddziaływań fundamentalnych]. Począwszy od 1993 roku, spotkania odbywały się corocznie i w szczytowym momencie gromadziły ponad pięciuset uczestników i uczestniczek. Każdego roku referaty przedstawiały zalety supersymetrii: naturalność, unifikację, a także kandydatów na ciemną materię. Każdego roku poszukiwania superpartnerów kończyły się negatywnymi rezultatami. Każdego roku modele były aktualizowane, aby uwzględnić brak dowodów.

Dotychczasowa porażka LHC w dostarczeniu dowodów na istnienie superpartnerów odbiła się na samopoczuciu teoretyków. „Jeszcze nie czas popadać w desperację... ale w depresję może już tak", stwierdził w 2011 roku włoski fizyk Guido Altarelli[9]. Ben Allanach z Uniwersytetu w Cambridge opisał swoją reakcję na analizę danych z LHC przedstawioną w 2015 roku jako „nieco przygnębiającą dla teoretyka supersymetrii takiego jak ja"[10]. Jonathan Ellis, teoretyk z CERN-u, określił sytuację, w której LHC nie znajdzie nic poza bozonem Higgsa, mianem „prawdziwej pięciogwiazdkowej katastrofy"[11]. Jednak nazwą, która się przyjęła, jest „koszmarny scenariusz"[12]. Właśnie przeżywamy ten koszmar.

Od 2006 roku nie uczestniczyłam w tych corocznych konferencjach – były zbyt przygnębiające. Ale znam z nich Keitha Olive'a i jego pracę nad supersymetrią. Keith jest profesorem fizyki na Uniwersytecie Minnesoty i kierownikiem Instytutu Fizyki Teoretycznej Williama I. Fine'a. Dzwonię do niego, by dowiedzieć się, co sądzi o braku śladów SUSY w LHC.

– Dostawaliśmy dane w małych porcjach – wspomina Keith. – Ograniczenia [wynikające z danych] stawały się coraz bardziej restrykcyjne. Co parę miesięcy, gdy otrzymywaliśmy analizę

nowych danych, robiło się odrobinę gorzej. To niewątpliwie prawda, że spodziewaliśmy się SUSY przy niższej energii. To duży problem. Jakaś część mnie wciąż uważa, że supersymetria powinna być częścią natury, aczkolwiek, tak jak mówisz, nie ma na nią dowodu. Czy powinna pojawiać się już przy niskiej energii? Tego, jak myślę, nikt nie wie. Ale sądziliśmy, że tak.

Keith reprezentuje poprzednie pokolenie, które było świadkiem sukcesów symetrii i unifikacji w sformułowaniu modelu standardowego. Ja jednak nie mam takich doświadczeń i nie mam powodu uważać, że piękno jest dobrym przewodnikiem. A jeśli chodzi o ten wewnętrzny głos, który podpowiada Keithowi, co jest, a co nie jest częścią natury, to mu nie ufam.

– Niby czemu SUSY powinna być częścią natury?

– Chodzi o siłę jej symetrii – mówi Keith. – Wciąż uważam ją za bardzo przekonującą. Co do możliwości jej dostrzeżenia przy niskich energiach, to wciąż, jak sądzę, jest to możliwe. Gdyby okazało się, że bozon Higgsa ma masę 115, 120 GeV, a SUSY by nie odkryto, byłoby to znacznie bardziej problematyczne. Pewne nadzieje daje to, że wartość masy Higgsa jest bliska górnym ograniczeniom. Postulowane cząstki muszą być ciężkie, więc ma to nawet trochę sensu, że LHC ich nie widzi.

Bozon Higgsa rozpada się szybko po wyprodukowaniu, a jego obecność trzeba wydedukować z produktów rozpadu, które docierają do detektora. Ale to, w jaki sposób się rozpada, zależy od jego masy. Jeśli byłby ciężki, to – o ile tylko zostałby w ogóle wyprodukowany – związany z nim sygnał byłby prostszy w detekcji. W ten sposób, nawet przed rozpoczęciem poszukiwań w LHC, na masę Higgsa nałożono ograniczenia zarówno od dołu, jak i od góry.

LHC ostatecznie potwierdził istnienie cząstki Higgsa o masie 125 GeV, na samym górnym krańcu zakresu, którego nie wykluczono wcześniej. Cięższy bozon Higgsa pozwala na cięższych

superpartnerów, a zatem jeśli idzie o SUSY, im jest on cięższy, tym lepiej. Niemniej dotychczasowe fiasko poszukiwań superpartnerów oznacza, iż cząstki takie muszą być tak ciężkie, że uzyskanie zmierzonej masy Higgsa jest możliwe jedynie przy precyzyjnym dostrojeniu parametrów modeli supersymetrycznych.

– Wiemy więc, że potrzeba nieco dostrojenia – mówi Keith. – To samo w sobie staje się dość subiektywną kwestią. Na ile złe jest precyzyjne dostrajanie?

∞∞

Jak już widzieliśmy, fizycy nie lubią numerycznych zbiegów okoliczności wymagających bardzo dużych liczb. A jako że odwrotnością bardzo dużej liczby jest bardzo mała liczba, czyli jedną da się przekształcić w drugą, teoretycy nie przepadają także za nimi. Ogólnie są sceptyczni wobec liczb zbytnio różniących się od 1.

Zmartwienie fizyków budzą jednak wyłącznie liczby pozbawione jednostek – tak zwane wielkości bezwymiarowe lub niemianowane, w przeciwieństwie do mianowanych, które są opatrzone jednostkami. Jest tak dlatego, że wartość wielkości mianowanej nie ma fundamentalnego znaczenia – zależy od wyboru jednostek. Rzeczywiście, przyjmując odpowiednie jednostki, można nadać wartość 1 dowolnej wielkości mianowanej. Prędkość światła, dla przykładu, wynosi 1, gdy wyrazić ją w latach świetlnych na rok. A zatem kiedy fizyków trapią jakieś liczby, to chodzi o wielkości pozbawione jednostek, takie jak stosunek mas bozonu Higgsa i elektronu, który, jak się okazuje, wynosi około 250 000 : 1.

Problem z masą bozonu Higgsa, który omawialiśmy wcześniej, nie polega na tym, że sama masa jest mała, albowiem takie stwierdzenie zależy od używanych jednostek i jako takie jest bez sensu. Masa Higgsa wynosi $1{,}25 \times 10^{11}$ eV, czyli pozornie dużo,

ale to tyle samo co $2{,}22 \times 10^{-21}$ grama, co z kolei wydaje się mało. Chodzi więc nie tyle o to, że sama masa Higgsa jest mała, ile o to, że mały jest stosunek masy Higgsa do (masy, która odpowiada) energii pojawiającej się w kwantowych poprawkach do tej masy. Liczę, że czytelnik wybaczy mi mój wcześniejszy brak precyzji.

Argumenty z naturalności biorą swój początek od żądania fizyków, by wszystkie wielkości bezwymiarowe były bliskie 1. Ale skoro nie muszą być dokładnie równe 1, to można się spierać, jak duża liczba jest jeszcze akceptowalna. Tak się składa, że w wielu równaniach pojawiają się liczby niemianowane i często są to czynniki niekoniecznie bliskie 1. Na przykład 2π podniesione do potęgi zależnej od liczby wymiarów przestrzennych może łatwo urosnąć do ponad 100 (zwłaszcza jeśli przestrzeń ma więcej niż trzy wymiary). A gdyby rozważyć nieco bardziej skomplikowany model, ta liczba mogłaby jeszcze wzrosnąć.

Podsumowując, dopuszczalny poziom precyzyjnego dostrojenia zależy od naszej tolerancji na wielkość czynników liczbowych. A zatem ocena tego, w jak dużych tarapatach jest supersymetria, skoro obecne wyniki z LHC wymagają od niej precyzyjnego dostrojenia w celu otrzymania poprawnej masy Higgsa, jest subiektywna. Może i potrafimy obliczyć, jak dużego dostrojenia wymaga dana teoria. Nie da się jednak obliczyć, ile dostrojenia są jeszcze skłonni zaakceptować teoretycy.

∞∞

– Jako jedną ze standardowych motywacji stojących za supersymetrią zawsze przywołuje się to, że dzięki niej unikamy precyzyjnego dostrojenia – mówi Keith. – Lubimy sobie wyobrażać, że jeśli istnieje jakaś teoria wykraczająca poza model standardowy, to gdyby w jej ramach rozpisać poprawki [kwantowe], nie trzeba by ich było dostrajać z taką precyzją.

– A co jest złego w precyzyjnym dostrojeniu?

– Nie podoba się nam! – odpowiada ze śmiechem. – Naturalność jest czymś w rodzaju zasady przewodniej. Można ją nazwać atrakcyjną, bo takie jest źródłowe znaczenie tego słowa: przyciąga nas. Garniemy się do niej. Koniec końców jedynym pewnikiem jest model standardowy. Co jest dla wszystkich frustrujące. Powinno istnieć coś wykraczającego poza model standardowy, choćby tylko miało wyjaśniać ciemną materię albo tłumaczyć, [dlaczego wszechświat zawiera więcej materii niż antymaterii]. Coś tam serio powinno być. Wielu ludziom po prostu trudno sobie wyobrazić, żeby to było coś przypadkowego, coś całkowicie bez związku. W moim odczuciu trzeba dodać symetrii lub dokonać unifikacji.

Pytam Keitha, jaką należałoby przyjąć strategię eksperymentalną, ale nie umie mi doradzić.

– Wszystko, co łatwe, już zrobiono – mówi. – Teraz będzie trudno. Bardzo trudno. W latach pięćdziesiątych, u zarania fizyki cząstek, było o wiele łatwiej. Nie było tak trudno zbudować maszyny osiągającej kilka gigaelektronowoltów i zacząć robić zderzenia. No i coś wypływało po prostu z każdej strony, a żadna z tych rzeczy nie była znana fizyce. Wszystkie te dziwności... to dlatego mówi się o cząstkach „dziwnych”! Liczba cząstek odkrywanych na rok była fenomenalna. A to prowadziło do najróżniejszych postępów w teorii. A teraz... ciężko jest bez jakichkolwiek wskazówek z eksperymentów. Pracujemy więc, opierając się na tym, co uważamy za piękne.

W skrócie

- Zazwyczaj eksperyment i teoria rozwijają się wspólnie.
- Prawa przyrody, które obecnie uważamy za najbardziej fundamentalne, opierają się na zasadach symetrii.

• • • Kiedy nowych danych jest mało, fizycy teoretyczni, oceniając teorie, polegają na swoim poczuciu piękna.

• • • Piękno nie jest kryterium naukowym, ale może bazować na doświadczeniu.

Rozdział 4

Pęknięcia w fundamentach

W którym spotykam się z Nimą Arkanim-Hamedem i usiłuję zaakceptować, że natura nie jest naturalna, że wszystko, czego się uczymy, jest super oraz że wszyscy mają w nosie, co myślę.

Świetna fucha

Grupa uczniów fotografuje Instytut Nielsa Bohra, kiedy docieram tam taksówką. Litery na froncie budynku układają się w nazwę instytutu i rok budowy: 1920. To właśnie tu, do Kopenhagi, prawie sto lat temu fizycy zjechali się, by tworzyć podstawy fizyki atomowej i mechaniki kwantowej, teorii, na których opiera się cała nowoczesna elektronika. Układy scalone, diody LED, aparaty cyfrowe i lasery – wszystko to zawdzięczamy równaniom opracowanym tutaj, gdy Heisenberg i Schrödinger przyjechali dyskutować o fizyce z Bohrem. Dobre miejsce na robienie zdjęć, kiedy twój nauczyciel patrzy.

Gdy tak stoję przed zamkniętymi drzwiami, a zimowy deszcz siecze mnie po twarzy, stwierdzam, że sam budynek może i pochodzi z 1920 roku, ale już elektroniczne zamki na pewno nie. Trzeba się trochę pobłąkać, żeby znaleźć recepcję w sąsiednim budynku. Młoda Dunka informuje mnie, że nie figuruję na liście spodziewanych gości, i pyta o cel mojej wizyty.

– Przyjechałam do Nimy Arkaniego-Hameda – odpowiadam, nagle bezbrzeżnie zdziwiona tym, że oto wskoczyłam w samolot jedynie w celu potrzymania przed czyjąś twarzą dyktafonu.

Ale Nima również przyjechał do instytutu z wizytą – nie wiem, do kogo – i on także nie figuruje na liście.

Kłamię tylko połowicznie, kiedy mówię, że przyjechałam z Nordity, byłego siostrzanego ośrodka Instytutu Nielsa Bohra, który przeniósł się do Sztokholmu w 2007 roku. Mimo iż mój kontrakt właśnie się zakończył, moje uśmiechnięte zdjęcie wciąż zdobi jego stronę internetową. Portierka wręcza mi kartę zbliżeniową.

Jestem zbyt wcześnie, odszukuję więc bibliotekę w głębi korytarza. Witają mnie znajome książki. Drewniana podłoga skrzypi, więc przestaję się ruszać, nie chcąc przeszkadzać snutym tu myślom, które mogą odmienić świat. Pachnie nauką, to znaczy kawą. Przypominam sobie, jak to rzekomo w czasie II wojny światowej obłożono budynek materiałami wybuchowymi, wychodząc z założenia, że lepiej będzie wysadzić go w powietrze, niż zostawić nazistom; jak głosi plotka, nikt nie ma pewności, czy po wojnie usunięto wszystkie ładunki. Ostrożnie ruszam dalej.

Właśnie postanowiłam namierzyć ekspres do kawy, gdy pojawia się Nima. Odkąd po raz pierwszy natrafiłam na jego artykuły pod koniec lat dziewięćdziesiątych, Nima zrobił spektakularną karierę. W roku 1999, w wieku dwudziestu siedmiu lat, został zatrudniony na Wydziale Fizyki w Berkeley. W 2002 roku przeniósł się na Harvard, od 2008 roku jest w Princeton, a w roku 2009 został wybrany na członka Amerykańskiej Akademii Sztuk i Nauk. Zdobył mnóstwo nagród, w tym Breakthrough Prize za „oryginalne podejście do utrzymujących się problemów w fizyce cząstek". Problemy te wciąż się utrzymują. Nima też się utrzymuje – na szczycie.

Prowadzi mnie do gabinetu, z którego korzysta w czasie pobytu w instytucie. Klapnąwszy na kanapie, nie bardzo wiem, co dalej. Dobrym pomysłem wydaje się wciśnięcie przycisku nagrywania

w dyktafonie. Wówczas Nima, jak gdyby tylko czekał na swoją kolej, zaczyna mówić, machając rękami i długimi włosami.

Kwestia piękna i naturalności, zaczyna, ostatnio mocno go zajmowała w świetle najnowszych wyników z LHC.

– Szeroko pojęty temat naturalności i piękna jest bardzo niewłaściwie przedstawiany – mówi Nima. – To łączenie piękna w sensie naukowym i w sensie artystycznym zapewne pomaga w sprzedaży książek. – Nie jest szczęśliwy z tego powodu. – Gdybyś była twardo stąpającą po ziemi laiczką i twoja wiedza o fizyce bazowałaby na *Pięknie wszechświata* Briana Greene'a, to, nie urągając Brianowi, mogłabyś uznać, że fizycy po prostu zmyślają jakieś bzdury. To niefortunne, bo też i bardzo odległe od rzeczywistości. Rzeczywistości porządnego, uczciwego fizyka.

Mówi dalej:

– Owszem, można łatwo odnieść wrażenie, że eksperymenty bywają praktycznie niewykonalne. A nawet jeśli któryś da się przeprowadzić, może to potrwać tak długo, że w praktyce przeżyjesz większą część swojego życia bez konieczności konfrontacji [z wynikami eksperymentu]. A nim to nastąpi, hulaj dusza, bo wszystko ujdzie. Możesz wymyślać niestworzone historie, a być może co jakiś czas, raz na jakieś pięćdziesiąt lat, przyjdzie jakiś eksperyment i co nieco wykosi. Świetna fucha, nieprawdaż? Siedzisz sobie, tworzysz jakieś dziwne teorie i nikt cię nigdy nie sprawdzi. Takie właśnie wrażenie bym odniósł.

Gdy skończyło się moje zatrudnienie w Nordicie, przeniosłam się ze Sztokholmu do Niemiec. Ale nowy grant badawczy jeszcze nie ruszył, więc aktualnie jestem bezrobotna. Nie pierwszy raz się to zdarza. Już od piętnastu lat skaczę z jednego krótkoterminowego kontraktu na drugi, zmieniając kraj, motywowana przekonaniem, że fizyka daje mi największe szanse na zrozumienie świata. To nie tyle profesja, ile obsesja. Moja

sytuacja jest normą, a sytuacja Nimy – wyjątkiem. Większości z nas nie można posądzić o posiadanie świetnej fuchy.

Nieświadomy moich myśli, Nima kontynuuje:

– A więc żadnego eksperymentu nie ma, a ty sobie siedzisz i snujesz opowieści o pięknie, elegancji i matematycznym wdzięku. I brzmi to jak jakieś socjologiczne brednie. Uważam, że to wrażenie jest całkowicie błędne, ale błędne z interesującego powodu. Powód ten odróżnia fizykę wysokich energii od niemal całej reszty nauki. To prawda – tłumaczy – że w większości innych działów nauki tym, co pozwala odsiać dobre pomysły od złych, są nowe eksperymenty. Nasza dziedzina jest jednak tak dojrzała, że już dotychczasowe eksperymenty dostarczają niewiarygodnie silnych ograniczeń. Są tak restrykcyjne, że z miejsca wykluczają właściwie wszystko, co można wymyślić. Jeśli jesteś uczciwym fizykiem, 99,99 procent twoich pomysłów, nawet tych dobrych, będzie trzeba wykluczyć, nie na podstawie nowych eksperymentów, ale w wyniku rozbieżności ze starymi. Właśnie to czyni naszą dziedzinę odmienną, dając nam sposób na odróżnianie idei celnych od chybionych bez przeprowadzania kolejnych doświadczeń. Tak więc w przeciwieństwie do tego, co mógłby sobie pomyśleć laik, to nieprawda, że możemy wyprawiać, co się nam żywnie podoba. To jest ciągła walka.

Walka. Co ty powiesz, myślę sobie i kiwam głową.

Robienie problemów

Pomimo swoich sukcesów model standardowy nie jest zbytnio hołubiony przez fizyków. Michio Kaku nazywa go „brzydkim i sztucznym", Stephen Hawking stwierdził, że jest on „brzydki i *ad hoc*", Matt Strassler uważa, że dyskredytuje go jego „brzydota i barokowość", Brian Greene utyskuje na jego „zbytnią elastyczność", a Paul Davies uważa, że „sprawia wrażenie czegoś

niedokończonego”, ponieważ „nieporadny sposób, w jaki grupuje oddziaływania elektrosłabe i silne” jest jego „nieprzyjemną cechą”[1]. Jeszcze nie spotkałam nikogo, komu model standardowy by się podobał.

Co sprawia, że jest taki niełady? Jego największą wadą są liczne parametry – liczby nieposiadające głębszego uzasadnienia – a wiele z nich wcale nie jest bliska jedynce. Już omawialiśmy, jaki ból głowy wywołuje masa Higgsa. Jest jednak więcej takich irytujących liczb, począwszy od mas innych cząstek elementarnych tudzież stosunków tych mas do masy Higgsa (pamiętajmy, że martwią nas wyłącznie wielkości bezwymiarowe). Te ostatnie przyjmują takie wartości jak 0,000004008 dla elektronu oraz 1,348 w wypadku kwarka wysokiego. Nikt nie potrafi wyjaśnić, dlaczego te stosunki mas są takie, a nie inne.

Jednak liczby te nie wydają się też zupełnie przypadkowe, co skłania fizyków do wiary w istnienie jakiejś głębszej teorii. Na przykład wszystkie trzy neutrina są bardzo lekkie – suma ich mas nie przekracza 10^{-11} (jednej stumiliardowej) masy cząstki Higgsa. Masy w poszczególnych generacjach fermionów różnią się od siebie z grubsza o czynnik 10. Znany jest też dziwny wzór Koidego, który wiąże ze sobą masy elektronu, mionu i taonu[2]. Mianowicie, jeśli podzielić sumę tych mas przez kwadrat sumy ich pierwiastków, w wyniku dostaje się 2/3 z dokładnością do piątego miejsca po przecinku. Dlaczego? Okazuje się, że podobne związki liczbowe zachodzą także dla innych cząstek, choć z mniejszą precyzją. Każe nam to przypuszczać, że kryje się za tym coś głębszego.

Oprócz mas są jeszcze macierze mieszania. Niektóre cząstki, podróżując z miejsca na miejsce, mogą przemieniać się – lub „oscylować” – w inne cząstki. Prawdopodobieństwa tego typu przemian zestawia się w tak zwane macierze mieszania[3]. Tu również mamy do czynienia z sytuacją, w której nie potrafimy póki

co wyprowadzić liczb figurujących w tych macierzach, ale równocześnie nie wydają się one całkiem przypadkowe. Jedne cząstki mieszają się z innymi w niemal równych proporcjach, a z kolei inne nie robią tego prawie wcale, choć mogłyby. Czemu tak jest? Nie wiemy.

Kolejny problem polega na tym, że model standardowy posiada zbyt dużo symetrii! Chodzi o tak zwaną symetrię CP. Związane z nią przekształcenie jest kombinacją zamiany ładunku elektrycznego cząstki na przeciwny (oznaczanej przez C jak *charge*, czyli po angielsku „ładunek") oraz zamiany cząstki na jej lustrzane odbicie (oznaczanej przez P jak *parity*, co tłumaczy się jako „parzystość"). Okazuje się, że wykonanie tego przekształcenia prowadzi do zmian w równaniach opisujących słabe oddziaływania jądrowe – a zatem oddziaływania elektrosłabe łamią symetrię CP. Elektrodynamika kwantowa nie może jej łamać. Oddziaływania silne mogłyby, ale z nieznanych przyczyn tego nie robią. Gdyby bowiem tak było, wpływałoby to na przykład na rozkład ładunku elektrycznego w neutronie, a niczego takiego nie stwierdzono.

Skalę łamania symetrii CP przez oddziaływania silne opisuje się za pomocą tak zwanego parametru theta (θ). Zgodnie z najnowszymi danymi wartość tego parametru jest skandalicznie mała, znacznie mniejsza niż 1.

Mechanizm, który zaproponowano w celu rozwiązania tego tak zwanego silnego problemu CP, polega na przyjęciu, że parametr theta jest wielkością dynamiczną, która osiągając minimum swojego potencjału, uzyskuje obserwowaną małą wartość[4]. Taki model jest naturalny, nie wymaga bowiem żadnych dodatkowych wielkich albo małych liczb. Jak jednak zauważyli Steven Weinberg oraz niezależnie Frank Wilczek, dynamicznej thecie musi towarzyszyć cząstka, którą Wilczek ochrzcił „aksjonem" (to pierwsza i, miejmy nadzieję, ostatnia cząstka nazwana po

detergencie do prania[23*]). Aksjonu jednak nie znaleziono, a silny problem CP wciąż czeka na rozwiązanie.

Ale nie tylko parametry liczbowe drażnią nas w modelu standardowym. Jest jeszcze niewyjaśniona sprawa istnienia aż trzech generacji fermionów i aż trzech symetrii cechowania. Czyż nie byłoby cudownie, gdyby udało się scalić oddziaływania elektrosłabe i silne, otrzymując w rezultacie teorię wielkiej unifikacji albo, jeszcze lepiej, supersymetryczną teorię wielkiej unifikacji? (Więcej na ten temat w rozdziale 7).

No i rzecz jasna także standardowy model kosmologiczny pozostawia wiele do życzenia. W nim też pojawia się szereg niewyjaśnionych parametrów. Dlaczego ilość ciemnej energii jest taka, a nie inna? Czemu ciemnej materii jest pięć razy więcej niż zwykłej materii? I czym w ogóle są ciemna materia i energia? W ramach standardowego modelu kosmologicznego opisujemy jedynie ich makroskopowe zachowanie, podczas gdy ich mikroskopowe własności nie odgrywają w nim żadnej roli. Czy w ogóle można mówić o mikroskopowych własnościach ciemnej materii i/lub energii? Czy są z czegoś zbudowane? A jeśli tak, to z czego? (Przedyskutujemy to w rozdziale 9).

Dalej, pojawiają się problemy z łączeniem standardowego modelu kosmologicznego z modelem standardowym cząstek elementarnych. Oddziaływanie grawitacyjne między cząstkami jest ekstremalnie słabe w porównaniu do pozostałych oddziaływań. Przykładowo, stosunek sił elektrycznych do grawitacyjnych między elektronem a protonem wynosi około 10^{40}. Ta kolejna niewyjaśniona mała liczba stanowi treść tak zwanego problemu hierarchii.

Na domiar złego ogólna teoria względności uparcie nie daje się połączyć w spójny sposób z modelem standardowym, w związku z czym fizycy już od osiemdziesięciu lat próbują skwantować grawitację – usiłują stworzyć teorię „grawitacji kwantowej”.

Oczywiście najchętniej scaliliby grawitację kwantową z pozostałymi oddziaływaniami, aby otrzymać teorię wszystkiego. (Wrócimy do tego w rozdziale 8).

No i wreszcie, nawet gdyby udało nam się rozwiązać wszystkie te kwestie, i tak utyskiwalibyśmy na mechanikę kwantową. (Będzie temu poświęcony rozdział 6).

∞∞

Powyższe problemy są znane przynajmniej od dwudziestu lat i żaden z nich nie wydaje się dziś bliski rozwiązania. Częściową przyczyną braku postępu jest wzrastająca trudność projektowania (i finansowania) nowych eksperymentów – wszystkie łatwe zostały już wykonane. Takie spowolnienie nie jest niczym zaskakującym – to znak, że mamy do czynienia z dojrzałą dziedziną badań.

Jak jednak widzieliśmy, teoretykom nie brakuje zagadek nawet bez napływu nowych danych doświadczalnych. Większość moich kolegów uważa zresztą, że problemy te dadzą się rozwiązać na gruncie czysto teoretycznym. Po prostu jeszcze im się nie udało. Również w badaniach teoretycznych postęp spowolnił, a powody są właściwie takie same jak w przypadku nowych eksperymentów: to, co łatwe, już zrobiono.

Ilekroć uda się rozwiązać jakiś problem, coraz trudniejsze staje się modyfikowanie czegokolwiek w obecnych teoriach bez ponownego generowania problemów w kwestiach, które już rozwiązano. W tym sensie znane nam dziś fundamentalne prawa przyrody wydają się konsekwencjami wcześniejszych osiągnięć. Tę nieuniknioność istniejących teorii często określa się mianem „sztywności” (*rigidity*). Pozwala ona mieć nadzieję, że wiemy już wszystko, co trzeba, aby znaleźć bardziej fundamentalną teorię – i że wystarczy w tym celu wytężyć mózgownicę.

Z jednej strony można uważać sztywność za dobry znak sygnalizujący, że jesteśmy blisko jedynej możliwej teorii zdolnej opisać obserwacje. Ale z drugiej strony można też interpretować ją tak, że zabrnęliśmy w ślepy zaułek, w związku z czym musimy ponownie zmierzyć się z dawno rozwiązanymi problemami i poszukać innej drogi.

∞∞

– Ujmując rzecz prościej – mówi Nima, parafrazując wcześniejszą uwagę – to, że dysponujemy zarówno teorią względności, jak i mechaniką kwantową, nakłada potężne ograniczenia. Powtórzę, bo uważam, że ten fakt nie jest powszechnie znany: teoria względności wspólnie z mechaniką kwantową dramatycznie, wręcz szokująco ograniczają pole manewru. Ta sztywność i nieuniknioność to coś zdecydowanie najważniejszego. Nazywaj to, jak chcesz, ale jak dla mnie to jest to samo co piękno.

– Ale czemu w ogóle stosujemy symetrie? Albo pola kwantowe? Albo zakrzywioną czasoprzestrzeń? – pytam, wymieniając niektóre standardowe konstrukcje matematyczne.

Używamy tych i innych abstrakcji, ponieważ działają, ponieważ odkryliśmy, że opisują przyrodę. Jednak z matematycznego punktu widzenia nie są one wcale nieuniknione; gdyby były, moglibyśmy do nich dojść na gruncie czystej logiki. Ale przecież nie da się udowodnić, że jakaś struktura matematyczna dostarcza prawdziwego opisu przyrody, albowiem dowody matematyczne dotyczą wyłącznie samych struktur, a nie ich relacji do rzeczywistości. A zatem argumenty ze sztywności mają sens dopiero wtedy, gdy określimy bazowe założenia, na których opieramy całe rozumowanie.

Przykładowo, grawitacja jest niemalże nieunikniona, gdy już zaakceptujemy ideę, że żyjemy w zakrzywionej czasoprzestrzeni.

Ale wcale stąd nie wynika, że faktycznie ją zamieszkujemy; po prostu okazuje się, że takie założenie działa. A przynajmniej działa w tych przypadkach, które sprawdziliśmy.

– Masz rację – odpowiada Nima. – Dyskutując o sztywności, zawsze poruszamy się w kontekście pewnych założeń, które uznaliśmy za prawdziwe. Ale nie wiemy, czy takie są; tego oczywiście wiedzieć nie możemy.

Przechodzi następnie do improwizowanego wykładu o początkach teorii strun, a potem znika, by przynieść kawę.

Trudno mi się z nim nie zgodzić. Kwantowanie grawitacji uchodzi za technicznie bardzo skomplikowany problem. Niesłychanie trudno utrzymać symetrie szczególnej teorii względności w kwantowej teorii grawitacji i trudność ta każe podejrzewać, że jeśli znajdziemy jakiś sposób, to zapewne będzie on jedyny.

Z drugiej strony, może to mówić więcej o ludziach niż o fizyce.

– Dlaczego SUSY wciąż przyciąga tyle uwagi? – pytam Nimy, gdy wraca.

Sącząc kawę, odpowiada:

– Jeśli rzeczywiście supersymetria czeka na odkrycie tuż powyżej [energii badanych w LHC], natychmiast nałoży niewiarygodnie silne ograniczenia na przyszłe teorie, i to jest interesujące. No bo jeśli, dajmy na to, istnieje czwarta generacja [fermionów], fakt ten nic nie wniesie. Innymi słowy, niektóre badania są intelektualnymi ślepymi zaułkami.

– A czy to dobrze – zastanawiam się – że teoretycy wolą nie zajmować się czymś, co może okazać się intelektualnym ślepym zaułkiem? Co jest nie tak z tymi pomysłami poza tym, że nie podobają się teoretykom?

– A kogo, do cholery, obchodzi, co się komuś podoba, a co nie? – mówi Nima. – Natura się tym nie przejmuje i co do tego się

zgadzamy. Powodem takiej popularności supersymetrii nie była po prostu socjologia. Decydujące było to, że [dzięki supersymetrii] dało się rozwiązać problemy, których inaczej nie udałoby się ugryźć. To, czy przyroda troszczy się o te problemy, to już inna sprawa. Bez SUSY zaczynają się kłopoty z naturalnością. Tego typu kwestie pojawiały się już wcześniej ze trzy razy i wówczas za każdym razem udawało się znaleźć rozwiązanie.

Tam, gdzie liczby nie mają imienia

Współcześnie teorię nazywamy naturalną, jeśli nie występują w niej ani bardzo wielkie, ani bardzo małe liczby. Teorii zawierających takie liczby nie uważa się za fundamentalne – nienaturalność stanowi pęknięcie, któremu trzeba się przyjrzeć.

Idea, że prawa przyrody powinny być w tym sensie naturalne, ma długą historię. Zaczynała jako kryterium estetyczne, dziś jednak nabrała postaci sformalizowanego matematycznego warunku znanego jako „techniczna naturalność". W wyniku awansu od nieco mglistej zasady do recepty ilościowej jej pozanaukowe pochodzenie zostało w dużej mierze zapomniane.

Za historycznie pierwsze odwołanie do naturalności można uważać odrzucenie modelu heliocentrycznego (ze Słońcem w centrum) na gruncie tego, że gwiazdy wyglądają na nieruchome. Gdyby Ziemia krążyła wokół Słońca, widome pozycje gwiazd powinny się zmieniać w ciągu roku. Wielkość tej zmiany, zwanej paralaksą, zależy od odległości od gwiazd; im dalej znajduje się gwiazda, tym mniejsza widoma zmiana pozycji. Podobny efekt można zobaczyć podczas jazdy pociągiem, patrząc na przesuwający się za oknem krajobraz: pobliskie drzewa przemykają znacznie szybciej w polu widzenia niż kontury odległego miasta.

Dawniej astronomowie sądzili, że gwiazdy są na stałe przytwierdzone do sfery niebieskiej zawierającej cały wszechświat. W takiej sytuacji, gdybyśmy nie znajdowali się w środku tej sfery, obserwowane przez nas pozycje gwiazd powinny zmieniać się w ciągu roku, ponieważ czasem bylibyśmy bliżej jakiejś części sfery, a czasem dalej. Tymczasem astronomowie nie widzieli takich zmian – stąd wniosek, że Ziemia leży w centrum wszechświata.

W rzeczywistości gwiazdy nieznacznie zmieniają swoją pozycję w ciągu roku, ale jest to tak niewielki efekt, że astronomowie nie byli w stanie go zmierzyć aż do XIX wieku. Wcześniej mogli się co najwyżej zastanawiać, czy brak obserwowalnej paralaksy oznacza, że Ziemia się nie porusza, czy to raczej gwiazdy znajdują się bardzo, bardzo daleko – o wiele dalej niż Słońce i pozostałe planety, wówczas bowiem paralaksa faktycznie byłaby znikoma. Ta druga możliwość pozwoliłaby Słońcu być w centrum, ale odrzucano ją, gdyż wymagałaby zaakceptowania niewytłumaczalnie wielkich liczb.

W XVI wieku Mikołaj Kopernik przedstawił przekonującą argumentację na rzecz modelu heliocentrycznego, wykazując, iż upraszcza on ruchy planet, wciąż jednak pozostawała kwestia paralaksy. Nie chodziło tylko o to, że gwiazdy musiałyby znajdować się znacznie dalej niż jakikolwiek obiekt w Układzie Słonecznym. Dodatkowy problem brał się stąd, że Kopernik i jemu współcześni błędnie oszacowali rozmiary gwiazd.

Światło z odległego źródła, przechodząc przez okrągłą aperturę – taką jak źrenica oka albo obiektyw/otwór teleskopu – doznaje rozmycia, w wyniku którego źródło wydaje się szersze, ale zrozumiano to dobrze dopiero w XIX wieku[24*]. Za sprawą tego złudzenia optycznego astronomowie czasów Kopernika mylnie uważali gwiazdy za większe, niż są w rzeczywistości. Skoro więc w modelu heliocentrycznym gwiazdy stałe musiały leżeć bardzo

daleko, a mimo to w teleskopach wyglądały na całkiem spore, prowadziło to niechybnie do wniosku, że muszą być gigantyczne, znacznie większe niż nasze Słońce.

Tycho Brahe uważał, że tak ogromne różnice rozmiarów są absurdalne, i na tej podstawie odrzucał ideę, że Ziemia porusza się wokół Słońca. W zamian zaproponował własny model, w którym Słońce krążyło wokół Ziemi, ale pozostałe planety krążyły wokół Słońca. W 1602 roku tak argumentował przeciwko heliocentryzmowi:

> Trzeba koniecznie zachować w tych kwestiach rozsądne proporcje, ażeby nie urosły one do nieskończoności, a sprawiedliwa symetria stworzeń i rzeczy widzialnych, gdy idzie o rozmiar i odległość, nie została pogrzebana: trzeba koniecznie zachować tę symetrię, albowiem Bóg, Stwórca Wszechświata, miłuje stosowny porządek, nie pomieszanie i nieład[5].

Pojęcia „rozsądnych proporcji” i „stosownego porządku” to właściwie dzisiejsze kryterium naturalności.

Teraz wiemy już, że większość gwiazd ma rozmiary porównywalne z naszym Słońcem, a w ogromnej odległości od gwiazd nie ma nic nienaturalnego. Zarówno typowe dystanse międzygwiezdne w Drodze Mlecznej, jak i dystanse międzygalaktyczne są zdeterminowane przez sposób, w jaki materia ulega zagęszczeniu pod działaniem własnej grawitacji w rozszerzającym się wszechświecie. Odległości te wyłaniają się dynamicznie i nie stanowią fundamentalnych parametrów jakiejś głębszej teorii.

Jednak idea, że wielkie liczby wymagają wyjaśnienia, pozostała wpływowa[6]. W 1937 roku Paul Dirac zauważył, że wiek wszechświata podzielony przez czas potrzebny światłu na przebycie odległości równej promieniowi atomu wodoru to około 6×10^{39} – z grubsza tyle samo, ile stosunek sił przyciągania

elektrycznego i grawitacyjnego między protonem a elektronem, wynoszący około $2{,}3 \times 10^{39}$. Co prawda nie są to dokładnie takie same liczby, ale według Diraca wystarczająco zbliżone, by postawić hipotezę, że muszą mieć wspólne pochodzenie. Dirac twierdził zresztą, że nie tylko te dwie liczby są jakoś powiązane, lecz „każde dwie wielkie liczby bezwymiarowe występujące w Przyrodzie są związane prostą relacją matematyczną, w której wszystkie współczynniki są rzędu jedności”[7].

Jest to tak zwana hipoteza wielkich liczb Diraca.

Zauważmy jednak, że Dirac włączył do swojej gry liczbowej stałą, która wcale nie jest stała: wiek wszechświata. Oznacza to, iż aby utrzymać zapostulowaną równość, także inne stałe przyrody musiałyby się zmieniać z czasem. To z kolei miałoby całe mnóstwo konsekwencji dla procesu formowania się struktur we wszechświecie i obecnie nie daje się pogodzić z obserwacjami[8].

Hipotezę wielkich liczb Diraca współcześnie uważa się za pozbawioną fundamentalnego znaczenia, przynajmniej w odniesieniu do wielkości wskazywanych przez samego Diraca. Niemniej wciąż żywa pozostaje leżąca u jej podstaw idea, że wielkie liczby wymagają wyjaśnienia, a przynajmniej że dla grup takich liczb warto szukać jakiegoś wspólnego źródła. Fizycy zwrócili bowiem uwagę, że występowanie podejrzanie wielkich lub małych liczb może wskazywać na obecność nowych, dotąd nieuwzględnionych efektów. To wzmocniło ich przekonanie, że każda teoria przejawiająca precyzyjne dostrojenie najpewniej wymaga rewizji.

Logika argumentów z naturalności przypomina próbę przewidzenia fabuły wieloodcinkowego serialu telewizyjnego. Kiedy bohater – tu: naturalność – znajduje się w śmiertelnych opałach, to zapewne przeżyje, a zatem musi się wydarzyć coś, co wyratuje go z pozornie beznadziejnej sytuacji.

Na przykład w klasycznej, nieskwantowanej elektrodynamice masa elektronu jest nienaturalnie mała. Chodzi o to, że elektron generuje pole elektryczne, którego energia powinna wnosić znaczny (a tak naprawdę nieskończony) wkład do masy. Pozbycie się tej tak zwanej energii samooddziaływania wymaga precyzyjnego dostrojenia w rachunkach, a to przecież byłoby nieeleganckie. Tak oto nasza bohaterka – naturalność – została uwięziona w płonącym budynku. Jeśli wspomniane powyżej obliczenia są poprawne, zginie.

Ale obliczenia nie są poprawne, ponieważ pomijają efekty kwantowe. Kiedy się je uwzględni, elektron okazuje się otoczony parami cząstek wirtualnych, które są bezustannie kreowane i anihilowane i nie dają się zaobserwować bezpośrednio. Obecność tych par sprawia jednak, że znikają problemy nieskwantowanej teorii z samooddziaływaniem. W ten sposób niewielka masa elektronu staje się „naturalna” w elektrodynamice kwantowej[9]. Nasza bohaterka skacze z dachu i bezpiecznie ląduje w śmietniku, cała i zdrowa.

W ramach fizyki cząstek brak liczbowych zbiegów okoliczności dorobił się ścisłego, matematycznego sformułowania znanego jako „techniczna naturalność”[10]. Co niesamowite, model standardowy jest w całości technicznie naturalny, nie licząc kłopotów z masą Higgsa. Nawet masy cząstek złożonych, związanych silnym oddziaływaniem jądrowym, są technicznie naturalne – z jednym wyjątkiem: masy trzech mezonów (obojętnego pionu i jego dwóch naładowanych kuzynów) są podejrzanie zbliżone; różnica kwadratów mas pionów naładowanego i obojętnego podzielona przez kwadrat którejkolwiek z nich daje nienaturalnie mały wynik. Nasza bohaterka znowu jest w tarapatach, przyparta do muru i trzymana na muszce.

Lecz również tym razem okazuje się, że obliczenia nie do końca poprawnie przewidywały, co się dzieje. W tym przypadku ratuje nas fakt, że powyżej pewnej energii manifestuje się nowy efekt fizyczny pod postacią cząstki – mezonu rho – a z nim wiąże się pewna nowa symetria, która tłumaczy, dlaczego masy pionów są tak podobne. Wyjaśnienie to jest technicznie naturalne, nie potrzeba żadnego dostrajania. Strzał jest chybiony i bohaterce udaje się uciec.

Ale zarówno kwantowe poprawki do energii samooddziaływania elektronu, jak i mezon rho nie były przewidziane zawczasu; nie były predykcjami, lecz postdykcjami, czyli swego rodzaju mądrością po fakcie (tak jakbyśmy oglądali powtórkę serialu). Jedynym rzeczywistym przewidywaniem poczynionym na bazie naturalności było istnienie kwarka powabnego, czwartej odkrytej cząstki z tej rodziny. Jego istnienie zapostulowano w 1970 roku w celu wyjaśnienia, dlaczego prawdopodobieństwa pewnych procesów w fizyce cząstek były nienaturalnie małe[11]. Wraz z wprowadzeniem kwarka powabnego procesy te stawały się po prostu zakazane, co w naturalny sposób, bez precyzyjnego dostrajania, tłumaczyło ich nieobecność w danych doświadczalnych.

Podsumowując, model standardowy odznacza się naturalnością, a ta ostatnia ma na swoim koncie całe jedno przewidywanie. Nie przeszkadza to twierdzić Nathanowi Seibergowi z Instytutu Badań Zaawansowanych w Princeton, że „[p]ojęcie naturalności od stuleci wytycza kierunek w fizyce”[12]. W związku z tym precyzyjne dostrojenie, czyli przeciwieństwo naturalności, budzi niesmak. Według Lisy Randall z Uniwersytetu Harvarda „[w]ydaje się, że dostrajanie jest powodem do wstydu, świadectwem naszej niewiedzy”[13]. Albo, jak powiedział mi fizyk cząstek Howard Baer: „Sądzę, że precyzyjne dostrojenie jest swego rodzaju dolegliwością teorii, której trzeba się przyjrzeć i która może

podpowiedzieć, jak te teorie naprawić i którędy wiedzie ścieżka w nieznane, ku granicom poznania”[14].

Stała kosmologiczna nie jest naturalna. Ale ma coś wspólnego z grawitacją, więc fizycy cząstek nie czują się za nią odpowiedzialni. Jak już jednak teraz wiadomo, również masa Higgsa nie jest naturalna, a więc tym razem problem stanął u ich bram.

Nikt nie obiecywał drogi usłanej różami

– Nie bronię naturalności – mówi Nima. – Naturalność nie jest zasadą, nie jest prawem. Traktowano ją raczej jako przewodnika. Czasem wywiązywała się z tego zadania dobrze, a czasem źle. Trzeba być otwartym na różne możliwości. Według niektórych naturalność to czysta filozofia, ale to z całą pewnością nie tak. Dużo nam dała.

Wymienia szereg przykładów przemawiających za naturalnością, nie pomijając także tego, co świadczy na jej niekorzyść, i konkluduje:

– Naturalność nie stanowiła, nie powinna była stanowić, argumentu na rzecz LHC. Oddając sprawiedliwość CERN-owi, argument ten pochodził od teoretyków. A skoro to powiedziano, to wcale nie było głupio sądzić, że naturalność będzie działać, biorąc pod uwagę jej wcześniejsze sukcesy.

Nima opowiada mi, że dziesięć lat temu, pomimo wcześniejszych sukcesów naturalności, porzucił naturalne piękno na rzecz nowej idei, nazywanej „supersymetrią rozdzieloną” (ang. *split SUSY*). Jest to wariant supersymetrii, w którym część spodziewanych superpartnerów jest w naturalny sposób tak ciężka, że znajdują się poza zasięgiem LHC. Miałoby to wyjaśniać, dlaczego do tej pory ich nie zaobserwowano. Niestety teorię tę trzeba precyzyjnie dostroić, aby otrzymać poprawną masę Higgsa.

Wspominając reakcję swoich kolegów na stosowanie precyzyjnego dostrojenia w swojej teorii, Nima stwierdza:

– Ludzie na konferencji dosłownie na mnie krzyczeli. Coś takiego nie przytrafiło mi się ani wcześniej, ani później.

Oto co się dzieje, gdy twoja teoria nie spełnia dzisiejszych standardów piękna.

– Czy LHC zmienił twoje spojrzenie na naturalność? – pytam.

– Ciekawe, krąży taka popularna opowieść, jak to przed LHC teoretycy byli najzupełniej pewni, że SUSY się pokaże, a teraz spadł na nich straszny cios. A mnie się wydaje, że fachowcy zajmujący się konstruowaniem modeli, ludzie, których uważam za najlepszych specjalistów w tej dziedzinie, byli zmartwieni już po LEP-ie. Ale unikanie [konfliktów z istniejącymi danymi] stało się programowe. To zresztą nie były jakieś wielkie rzeczy, ale raczej małe, irytujące drobiazgi. Ci najlepsi wcale nie byli pewni, że SUSY uda się zobaczyć w LHC. I nic się nie zmieniło pod względem jakościowym od roku 2000 [gdy LEP zakończył swój ostatni kurs]. Pewne furtki zostały zamknięte, ale jakościowo wszystko jest po staremu.

Nima ciągnie dalej:

– Pytasz, czemu ludzie wciąż się nią zajmują? To właściwie dość zabawne. Jak już powiedziałem, najlepsi dosyć dobrze rozumieli, co się dzieje; nie siedzieli z założonymi rękami, czekając, aż z LHC zaczną się sypać gluina[15]. Toteż zareagowali ze spokojem na nowe dane.

Tylko że ani jeden z tych „najlepszych” nie zabrał głosu i nie podważył szeroko rozpowszechnionej informacji, jakoby LHC miał spore szanse na odkrycie supersymetrii lub cząstek ciemnej materii. Nie jestem pewna, kogo bardziej nie znoszę: zwolenników argumentów z piękna czy może naukowców, którzy świadomie wprowadzają opinię publiczną w błąd na temat perspektyw związanych z kosztownymi eksperymentami.

– Ci, którzy byli pewni, że SUSY się pokaże – kontynuuje Nima – teraz zgadzają się, że jej nie ma. Niektórzy wyznają, że są przygnębieni, zmartwieni albo przerażeni. Doprowadza mnie to do szału. To niedorzeczny narcyzm. Kogo obchodzicie ty i twoje małe życie? Poza tobą, rzecz jasna.

Nie mówi dosłownie o mnie, ale kto go tam wie. Być może przyjechałam tu w poszukiwaniu wymówki, żeby opuścić akademię, bo jestem zawiedziona, niezdolna do znalezienia motywacji w obliczu tych wszystkich negatywnych rezultatów. I proszę, jaką świetną wymówkę znalazłam – obwinienie społeczności naukowej za niewłaściwe posługiwanie się metodą naukową!

– Wszystko, czego dowiadujemy się o przyrodzie, jest niesamowite. – Głos Nimy wdziera się w moje myśli. – Jeśli znajdujesz nowe cząstki, dostajesz więcej wskazówek. A nawet jeśli nie, zawsze jest to jakaś wskazówka. Używanie takiego języka to objaw narcyzmu naszych czasów. Dawniej nie byłoby ci wolno tak mówić w kulturalnym towarzystwie. Kogo obchodzą twoje uczucia? Kogo obchodzi, że spędziłeś nad tym czterdzieści lat życia? Nikt nie obiecywał drogi usłanej różami. To ryzykowny biznes. Jeśli chcesz pewności, rób co innego ze swoim życiem. Ludzie czasem przez stulecia brnęli w niewłaściwym kierunku. Takie życie.

Rozmawiamy już godzinami, ale energia Nimy wydaje się nieskończona, niemal nienaturalna. Słowa wpadają na siebie, bo nie są w stanie wyjść z jego ust dostatecznie szybko. Podskakuje i kręci się w swoim fotelu; niekiedy podrywa się i bazgrze po tablicy. Im dłużej na niego patrzę, tym starsza się czuję.

– Frustruje mnie to zwłaszcza wtedy, gdy ich poczucie przygnębienia rzutuje na nasze plany na przyszłość – mówi. – Uważam, że to śmieszne. To bardzo ważne dowiedzieć się, czy naturalność jest błędna.

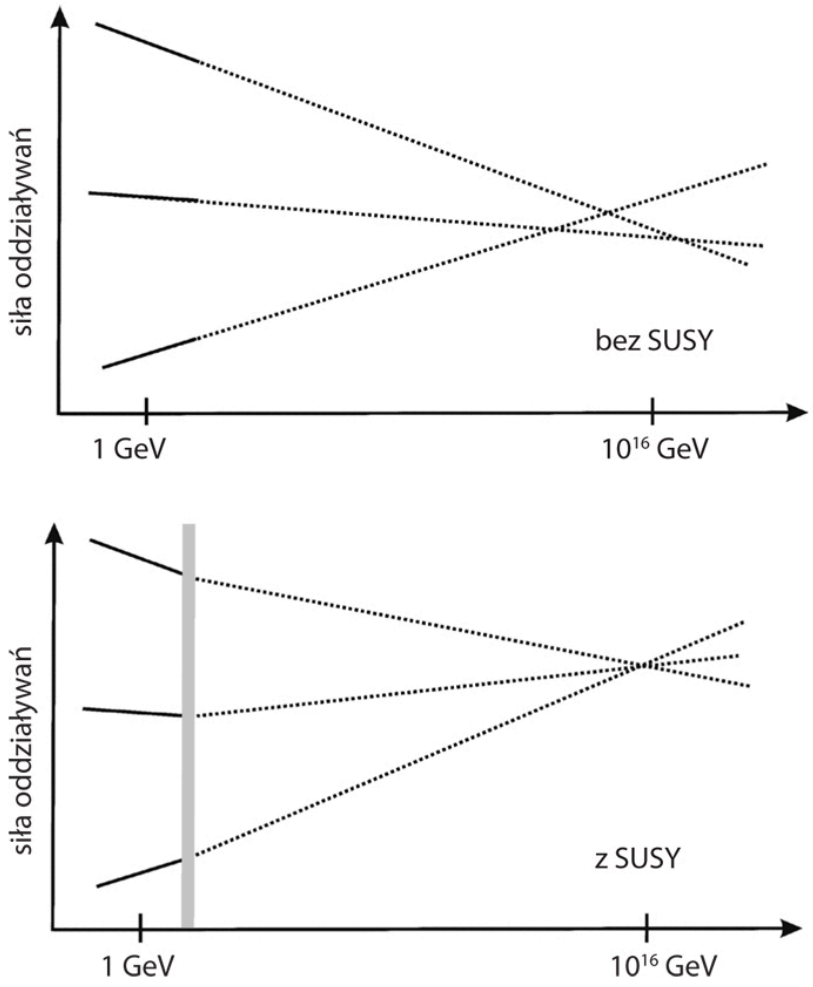
Nie trzeba dodawać, że fizycy cząstek już lobbują za nowym zderzaczem. Faworyzowany przez Nimę chiński zderzacz kołowy osiągałby energię około 100 TeV na zderzenie, ale to nie jedyna obecnie dyskutowana opcja[16]. Inną dobrze przyjętą propozycją jest Międzynarodowy Zderzacz Liniowy (*International Linear Collider*), którego budową zainteresowali się Japończycy. Natomiast CERN ma w planach super-LHC o stukilometrowym obwodzie, osiągający energie porównywalne ze swoim chińskim konkurentem. Może wtedy uda się odkryć SUSY.

– SUSY to w rzeczywistości taka historia o gotującej się żabie – mówi Nima, wspominając przeszłość tej teorii. – Powinna była objawić się już w LEP-ie 1[25*], w 1990 roku. Wielu teoretyków w tej branży, których bardzo szanuję, spodziewało się SUSY właśnie w LEP-ie. Sam się jej spodziewałem. Tak się jednak nie stało – mówi – ale uznaliśmy to za szansę, nie za kłopot. Stwierdziliśmy: „No dobra, czyli teoria musi odznaczać się pewną szczególną strukturą”... W latach dziewięćdziesiątych to była zupełnie rozsądna możliwość. Ale potem ograniczenia uległy wzmocnieniu, a superpartnerów wciąż nie było. A wtedy LEP pomierzył stałe sprzężeń na tyle dokładnie, że stało się jasne, iż [w ramach modelu standardowego] stałe te się nie spotkają, za to spotkałyby się w ramach SUSY.

∞∞

W teorii z cechowaniem najważniejszym parametrem jest stała sprzężenia, która określa siłę oddziaływania. Model standardowy zawiera trzy takie stałe: dwie dla oddziaływań elektrosłabych i jedną dla silnych. Stałe te nie zmieniają się w czasie i przestrzeni, ale ich wartość zależy od poziomu rozdzielczości, na którym odbywa się pomiar. Jest to przykład wspomnianego wcześniej przepływu w przestrzeni teorii.

Badanie tego, co dzieje się na małych odległościach, wymaga wysokich energii, a zatem niski poziom rozdzielczości odpowiada niskim energiom, a wysoki poziom rozdzielczości – wysokim. W fizyce wysokich energii, jak sama nazwa wskazuje, uczeni posługują się raczej energią niż rozdzielczością, analizując przepływ w przestrzeni teorii. W czasie tego przepływu stałe sprzężeń zmieniają swoje wartości, przez co fizycy nazywają je „biegnącymi stałymi”, a ich „bieg” daje się wyliczyć.



Rysunek 8. Schematyczna ekstrapolacja (linie przerywane) sił znanych oddziaływań przeprowadzona od obszaru przebadanego eksperymentalnie do obszaru wysokich energii. Przy założeniu supersymetrii krzywe spotykają się w jednym punkcie, o ile cząstki SUSY zaczną wkrótce pojawiać się w zderzaczach (przy energiach leżących blisko szarego paska). Powyżej energii unifikacji podział na poszczególne siły traci sens.

Gdy przeprowadzi się te obliczenia w ramach modelu standardowego, otrzymane krzywe zgadzają się z pomiarami dla osiągalnych obecnie energii. Ekstrapolując te obliczenia na wyższe energie, otrzymuje się krzywe przecinające się w trzech różnych punktach (por. rysunek 8, górny wykres). Kiedy jednak dołoży się supersymetrię, krzywe przetną się w jednym punkcie (w granicach

niepewności pomiarów przy niskich energiach); następuje tak zwana unifikacja sprzężeń cechowania (rysunek 8, dolny wykres). Jeśli na poziomie fundamentalnym istnieje tylko jedna symetria cechowania, to istnieje też tylko jedna stała sprzężenia, a zatem trzy znane stałe muszą się finalnie spotkać. To, że SUSY przewiduje ten efekt w wysokich energiach, stanowiło jedną z najsilniejszych motywacji za rozwijaniem tej teorii. Czy unifikacja sprzężeń cechowania jest niezbędna? Nie. Czy jest ładna? Z pewnością.

∞∞

– Wydaje mi się, że szczyt popularności SUSY przypadł na lata ’91, ’92” – mówi Nima. – Od tego czasu podniecenie opadało. Kiedy nie pojawiła się w LEP-ie 2, w społeczności dało się słyszeć sporo głosów, że mamy problem, bo powinniśmy byli zobaczyć ją już wcześniej. Ale jeśli superpartnerzy nie istnieją, to dlaczego unifikacja sprzężeń działa? No i co z ciemną materią, czemu dla niej to działa?

– No, nie wiadomo, czy działa – zauważam.

– Tak, tak, oczywiście – zgadza się Nima.

– Dostarcza kandydata?

– Okej – mówi. – Dlaczego SUSY dostarcza nam kandydata na cząstki ciemnej materii? Czemu całość wygląda tak, jakby chciała działać?

Milczę. Trudno uwierzyć, że to wszystko to tylko pozbawiony znaczenia zbieg okoliczności. SUSY stanowi tak naturalną kontynuację dotychczasowych prób unifikacji, działa tak elegancko, wpasowuje się tak gładko – że to nie może być li tylko myślenie życzeniowe i mentalność stada u fizyków. Albo ja jestem idiotką, albo tysiąc ludzi z nagrodami i wyróżnieniami. Nie mam zbytnich szans.

– Wracając do pytania, dlaczego ludzie wciąż się tym zajmują – przełamuje milczenie Nima – zacznijmy od tego, że zainteresowanie supersymetrią znacznie spadło. To znaczy wciąż są tacy, którzy nad nią pracują. W światku naukowców panoszy się wiele chorób, a jedna z nich polega na tym, że jeśli czymś się zajmujesz, to dalej będziesz się tym zajmować. Jakimś cudem dzieje się tak, że każdy przedłuża analitycznie

to, co robił w ramach doktoratu[26*]. Na szczęście doświadczalników to nie obchodzi.

– Ale przecież to teoretycy mówią doświadczalnikom, na co patrzeć.

– Racja – odpowiada.

Zgadzam się jednak, że jesteśmy na właściwym tropie. Wszystko jest w porządku. Czas wrócić do roboty, zbudować kolejny zderzacz, zrozumieć, o co chodzi z tym bozonem Higgsa. Nie potrzebujemy pomocy filozofów.

Lecąc z powrotem do Frankfurtu, pozbawiona entuzjazmu Nimy, zaczynam rozumieć, w jaki sposób stał się on tak wpływowy. W przeciwieństwie do mnie wierzy w to, co robi.

Początek dwufotonowej biegunki

Jest 15 grudnia 2015 roku. Tak jak tysiące moich kolegów na całym świecie oglądam transmisję nadawaną na żywo z CERN-u. Członkowie eksperymentów CMS i ATLAS, dwóch największych doświadczeń prowadzonych przy LHC, mają dziś zaprezentować pierwsze wyniki drugiego kursu akceleratora, pomiary dotyczące odległości krótszych, niż kiedykolwiek badano.

Scenę przejmuje Jim Olsen z zespołu CMS. Zaczyna wykładać ogólną konstrukcję detektora i stosowane metody analizy. Szkoda, że nie da się przewinąć do przodu. To może być dzień, w którym

model standardowy zacznie się kruszyć – chcę zobaczyć dane, a nie zdjęcia magnesów!

Podczas pierwszego kursu pojawiły się pewne niewielkie odstępstwa od przewidywań modelu standardowego. Takie niezgodności mogą być – i często są – dziełem przypadku, skutkiem losowych fluktuacji. Dlatego naukowcy przypisują każdej odchyłce od obecnie najlepszych teorii pewną miarę istotności, związaną z prawdopodobieństwem, że jest ona tylko zbiegiem okoliczności. Dla danych z pierwszego kursu, o których mowa, wciąż istniała mniej więcej jednoprocentowa szansa, że są statystycznym wahnięciem. Tego typu fluktuacje bezustannie pojawiają się i znikają, więc nie należy się nimi zbytnio ekscytować.

Wreszcie Olsen dociera do wyników zebranych przez CMS. I faktycznie istotność wszystkich fluktuacji z pierwszego kursu zmalała, co oznacza, że niemal na pewno stanowiły losowy szum. Zespół przeanalizował następnie dane z drugiego kursu pod kątem efektów popularnych w ostatnich latach wśród teoretyków. Nie znaleźli niczego: ani dowodów na dodatkowe wymiary, ani superpartnerów, ani mikroskopijnych czarnych dziur, ani czwartej generacji fermionów. Większość komunikatu, wygłoszonego przy dużym zainteresowaniu mediów, stanowiła pasmo negatywnych rezultatów. Ciekawe, co na to Gordon Kane.

Pod sam koniec jednak Olsen pokazuje nowe odstępstwo od modelu standardowego: zarejestrowano zbyt wiele rozpadów dających w efekcie dwa fotony. Nadmiar ten, nazwany anomalią dwufotonową, nie pasuje do żadnych istniejących modeli. Nie zgadza się nie tylko z modelem standardowym, ale też z żadną ze znanych teorii. W tym momencie Olsen oddaje głos Marumiemu Kado z eksperymentu ATLAS.

Referat Kado jest niemal identyczny z wygłoszonym przez Olsena. Wcześniejsze fluktuacje zanikły, ale również ATLAS

stwierdził nadmiar rozpadów dwufotonowych tam, gdzie nie powinno go być. Fakt, że oba eksperymenty niezależnie zarejestrowały ten efekt, znacznie obniża ryzyko, że jest to zwykły przypadek. Szansa na to, że sygnał jest losową fluktuacją, zostaje oszacowana na 3 do 10 000. To wciąż bardzo daleko od standardu pewności wymaganego w fizyce cząstek – wynoszącego z grubsza 1 do 3,5 miliona – aby można było mówić o odkryciu. Ale to może być wreszcie to, myślę; pierwszy krok na drodze do bardziej fundamentalnego prawa przyrody. Od razu zaczynamy dyskutować, co to może być.

Dzień później otwarte archiwum elektroniczne arXiv.org wymienia już dziesięć nowych artykułów naukowych poświęconych anomalii dwufotonowej.

W skrócie

- Fizycy teoretycy mają wiele do zarzucenia prawom przyrody odkrytym do tej pory. Szczególnie nie przepadają za liczbami noszącymi znamiona nienaturalności.
- Naturalnością posługiwano się w procesie rozwijania teorii przyrodniczych przynajmniej od XVI wieku. Czasem to działało, czasem nie.
- Naturalność nie jest kryterium matematycznym. Jest sformułowanym matematycznie wymogiem natury estetycznej. Jej nieskuteczność nie uzasadnia jej stosowania nawet w świetle dawnych sukcesów.

Rozdział 5

Teorie idealne

W którym poszukuję granic nauki, ale okazuje się, że wyobraźnia fizyków teoretyków jest nieograniczona. Lecę do Austin, pozwalam mówić Stevenowi Weinbergowi oraz odkrywam, ile rzeczy robimy, byle tylko się nie nudzić.

Zaskocz mnie – ale nie za bardzo

Może cię zaskoczyć, jak wiele wspólnego mają Bach i Beatlesi.

W 1975 roku Richard Voss i John Clarke, fizycy z Berkeley, badali szumy w urządzeniach elektronicznych[1]. Dla zabawy zastosowali następnie swoje metody do różnych gatunków muzyki. Ku swemu zaskoczeniu odkryli, że wszystkie typy muzyki – czy to zachodnia, czy wschodnia, czy to blues, czy jazz, czy muzyka klasyczna – przejawiają pewien wspólny wzorzec: choć poszczególne style różnią się głośnością i tonami, stopień zmienności tych ostatnich okazuje się zawsze odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości[27*]. Wzorzec taki nazywa się „widmem typu $1/f$ ". Oznacza to, że większa zmienność pojawia się w muzyce rzadziej, ale nie ma jakiegoś preferowanego tempa zmienności – cykle głośno–cicho oraz cykle melodyczne mogą mieć dowolną długość.

Teoretycznie do widma typu $1/f$ nie da się przypisać żadnej charakterystycznej skali czasowej, choć można by się spodziewać, że dla danego stylu muzycznego będzie ona związana z metrum lub rytmem. Badanie dowodzi więc, że układ dźwięków w muzyce odznacza się samopodobieństwem lub „korelacjami" rozciągającymi się na wszystkie skale czasowe. Tak zwany biały

szum wiązałby się ze stałym widmem i brakiem korelacji między fluktuacjami. Z kolei melodia polegająca na błądzeniu przypadkowym między sąsiadującymi tonami charakteryzowałaby się silnymi korelacjami i widmem typu $1/f^2$. Jak wykazali Voss i Clarke, gdzieś pomiędzy tymi skrajnościami znajdują się Bach, Beatlesi i wszystko inne, co słyszymy w radiu[2].

Intuicyjnie wynika stąd, że dobra muzyka leży na granicy między przewidywalnością a nieprzewidywalnością. Gdy włączamy radio, chcemy dać się zaskoczyć – ale nie za bardzo. Nie jest więc niespodzianką, że muzyka popularna rządzi się stosunkowo prostymi regułami, a słuchacz może się przyłączyć do śpiewania, gdy wchodzi refren.

To spostrzeżenie na temat muzyki przenosi się, jak sądzę, na inne obszary ludzkiego życia. Również w sztuce, w literaturze, a nawet w nauce lubimy być zaskakiwani, byle nie za bardzo. Choć dla artykułów naukowych znacznie trudniej ująć to ilościowo niż dla układów dźwięków, one także muszą w wyważony sposób łączyć stare z nowym. Nowinki są dobre, ale nie mogą być nazbyt wymagające dla publiczności. Rasowe gwiazdy muzyki pop, tak samo jak ich naukowi odpowiednicy, żyją dokładnie na granicy; to ci, którzy sprawiają, że łapiemy się za głowę, mrucząc pod nosem: „Czemu sama na to nie wpadłam?”.

Ale w przeciwieństwie do sztuki pomysły naukowe nie stanowią celu same w sobie; mają pomagać w opisywaniu świata przyrody. W nauce nowe dane mogą wymuszać zmiany. Co jednak, jeśli nowych danych nie ma? Otóż wtedy sięgamy po dawne przeboje, odświeżając je w mniej lub bardziej pomysłowy sposób. Nowe teorie fizyczne, tak jak nowe piosenki, są wówczas wariacjami znanych motywów.

∞∞

Obecnie popularne motywy w fizyce teoretycznej to prostota, naturalność i elegancja. Ściśle rzecz biorąc, pojęć tych nigdy się nie definiuje – i ja także nie będę próbowała tego robić; powiem po prostu, jak się ich używa.

Prostota

Prostota oznacza oszczędność środków. Aczkolwiek, jak już zauważył Einstein, teoria powinna być „tak prosta, jak to tylko jest możliwe, ale nie prostsza”[28*]. Sam wymóg prostoty to jednak za mało, żeby sformułować teorię – wszakże da się wymyślić całe mnóstwo teorii prostszych niż te, które opisują nasz wszechświat. Zacznijmy od tego, że nie znamy żadnego dobrego powodu, by wszechświat w ogóle istniał lub by zawierał materię. Albo, by przytoczyć jakiś mniej nihilistyczny przykład: kwantowanie grawitacji jest znacznie prostsze w dwóch wymiarach – tyle że nie żyjemy w dwuwymiarowym wszechświecie i już.

A zatem prostota ma wartość wyłącznie względną. Możemy poszukiwać teorii prostszej *niż* jakaś inna teoria, ale nie da się wystartować, opierając się na samej prostocie.

To niemal tautologia, że spośród dwóch teorii dających to samo naukowcy koniec końców zdecydują się na prostszą, no bo po co utrudniać sobie życie bardziej, niż to konieczne. Historycznie taka decyzja bywała opóźniona, kiedy prostota wchodziła w konflikt z innymi hołubionymi ideami, takimi jak piękno planetarnego ruchu po okręgach. Ale lenistwo zawsze brało górę, przynajmniej jak dotąd.

Napisałam, że to tylko *niemal* tautologia, prostota jest bowiem w ciągłym napięciu z dokładnością teorii. Dołożenie dodatkowych parametrów, a więc zmniejszenie prostoty, zwykle pozwala uzyskać lepsze dopasowanie danych, a za pomocą metod statystycznych można obliczyć, czy osiągnięta poprawa uzasadnia wprowadzanie nowych parametrów. Można debatować nad

wadami i zaletami różnych metod, ale na nasze potrzeby wystarczy wspomnieć, że poszukiwaniem rozszerzeń teorii, które mogą wchodzić w konflikt z prostotą, zajmuje się dziedzina zwana fenomenologią[3].

Pojęciem umożliwiającym obiektywne ilościowe oszacowanie prostoty jest złożoność obliczeniowa, którą mierzy się ilością obliczeń wykonywanych przez program komputerowy. Zasadniczo można przypisać złożoność obliczeniową każdej teorii, która da się przełożyć na komputerowy kod, a współcześnie stosowane teorie fizyczne mają tę własność. My jednak nie jesteśmy komputerami i w związku z tym nie wykorzystujemy złożoności obliczeniowej jako miary prostoty. Ludzkie rozumienie tej ostatniej polega raczej na łatwości zastosowania, co blisko wiąże się z naszą zdolnością uchwycenia danej idei, utrzymania jej w głowie i manipulowania nią, aż wyjdzie z tego artykuł naukowy.

Aby zapewnić prostotę nowo proponowanych praw przyrody, teoretycy usiłują minimalizować zestawy założeń. Można to osiągnąć przez zmniejszanie liczby parametrów, liczby pól lub – ogólniej – liczby aksjomatów danej teorii. Najpowszechniejszymi sposobami są obecnie unifikacja oraz dokładanie symetrii.

Oczekiwanie, iż fundamentalna teoria nie będzie zawierać niewyjaśnionych parametrów, było także jednym z marzeń Einsteina:

> [P]rzyroda jest tak skonstruowana, iż można logicznie ustanowić takie silnie określone prawa, że w ramach tych praw występują tylko racjonalnie, kompletnie określone stałe (a zatem nie są to stałe, których numeryczne wartości mogą się zmieniać bez burzenia teorii)[4].

To marzenie wciąż napędza dzisiejsze badania. Nie wiemy jednak, czy bardziej fundamentalne teorie koniecznie muszą być też prostsze. Założenie, że będą prostsze – przynajmniej

z naszego punktu widzenia – jest wyrazem naszych nadziei, a nie czymś, czego możemy rozsądnie oczekiwać.

Naturalność

W przeciwieństwie do prostoty, która przygląda się liczbie założeń, naturalność skupia się na ich typie. Chodzi o próbę pozbycia się czynnika ludzkiego poprzez wymóg, by „naturalna” teoria nie zawierała sztucznie dobranych założeń.

Techniczna naturalność różni się od ogólnie rozumianej naturalności tym, że stosuje się wyłącznie do kwantowych teorii pola. Obie jednak bazują na tym samym założeniu: należy unikać tego, czego przypadkowe zaistnienie jest nieprawdopodobne.

Kryterium naturalności jest jednak bezużyteczne bez dodatkowych założeń, które same wymagają dokonywania nieuzasadnionych wyborów i przez to przywracają sztuczność. Chodzi o to, że istnieje nieskończenie wiele sposobów definiowania, co rozumie się przez przypadkowość, a zatem już samo mówienie o (nie)prawdopodobieństwie wymaga pewnej arbitralnej decyzji.

Rozważmy następujący przykład. Dla uczciwej, symetrycznej kostki do gry prawdopodobieństwo wyrzucenia którejkolwiek sumy oczek wynosi po tyle samo: 1/6. Ale jeśli kostka ma nieregularny kształt, prawdopodobieństwa poszczególnych wyników rzutów mogą się różnić. Taka niesymetryczna kostka odznacza się, jak mówimy, innym „rozkładem prawdopodobieństwa”, to jest funkcją zadającą prawdopodobieństwa otrzymania każdego możliwego wyniku. Taka funkcja może być dowolna, byle prawdopodobieństwa sumowały się do 1[29*].

Gdy mówimy, że coś jest losowe, bez dalszego uszczegółowienia, zwykle mamy na myśli rozkład jednostajny, to jest taki, który przypisuje każdemu wynikowi takie samo

prawdopodobieństwo, tak jak w wypadku uczciwej kostki do gry. Ale właściwie czemu rozkład prawdopodobieństwa dla parametrów jakiejś teorii powinien być jednostajny? Wszak dysponujemy tylko jednym zestawem wartości parametrów, który opisuje nasze obserwacje. To tak, jakby ktoś podał nam jedynie wynik pojedynczego rzutu kostką. Nie powie to nam jeszcze nic na temat kształtu kostki. Rozkład jednostajny, podobnie jak symetryczna kostka, może wydawać się schludny. Jest to jednak dokładnie taki rodzaj arbitralności, którego usiłujemy się pozbyć w ramach dążenia do naturalności[30*].

Co gorsza, nawet jeśli wybierzemy sobie jakiś rozkład prawdopodobieństwa, to naturalność wciąż będzie kryterium pozbawionym znaczenia, ponieważ wszystkie teorie, jakie tylko możemy wymyślić, są z jej punktu widzenia nienaturalne. Chodzi o to, że wymóg naturalności jest obecnie stosowany selektywnie wyłącznie do założeń jednego typu: wielkości bezwymiarowych. Tymczasem w procesie rozwijania teorii przyjmuje się wiele innych założeń, podyktowanych „tylko" próbą wyjaśnienia obserwacji. Po prostu zwykle o nich nie mówimy.

Przykładem jest stabilność próżni. To powszechnie przyjmowane założenie, dzięki któremu otaczający nas wszechświat nie rozpada się spontanicznie, rozrywając nas na strzępy. Brzmi rozsądnie. Istnieje jednak nieskończenie wiele „złych" teorii, w których może się to zdarzyć. Takie teorie są matematycznie bez zarzutu; są złe po prostu dlatego, że nie opisywałyby tego, co widzimy. Zakładamy stabilność próżni wyłącznie w celu opisania przyrody, a mimo to nikt nigdy nie narzeka, że jest to sztuczne, „nienaturalne" założenie. Można wskazać wiele innych założeń tego typu, które przyjmujemy po prostu dlatego, że działają, a nie dlatego, że są w jakimś sensie prawdopodobne. A skoro jesteśmy skłonni zaakceptować tego

typu założenia „po prostu dlatego, że...”, dlaczego na podobnej zasadzie nie dobierać wartości jakiegoś parametru?

„No cóż – ktoś powie – od czegoś trzeba zacząć”. Zacznijmy więc od wyjaśnienia wartości parametrów, a potem stopniowo dojdziemy do bardziej skomplikowanych założeń.

Odpowiem wówczas, że już sama próba uzasadnienia stosowanych przez nas założeń stanowi logiczny absurd: jeśli czyimś zdaniem nie godzi się wybierać założeń inaczej niż za pomocą matematyki, to wówczas jedynym dopuszczalnym wymogiem dla teorii fizycznych jest matematyczna spójność. W konsekwencji wszystkie logicznie spójne zestawy aksjomatów są równie dobre, a jest ich nieskończenie wiele. To jednak jest kompletnie bezużyteczne w kontekście opisywania przyrody – nie chodzi nam przecież o stworzenie listy spójnych teorii, ale o wyjaśnienie naszych obserwacji. W tym celu niezbędne jest porównanie przewidywań z empirią, które pozwoli wyselekcjonować użyteczne założenia dla naszych teorii. A to dokładnie robiliśmy, zanim daliśmy się uwieść ideałom w rodzaju naturalności.

Również idea, że liczby bliskie 1 są w jakimś sensie preferowane, nie posiada głębszego uzasadnienia matematycznego. Jeśli poszpera się trochę po zakamarkach matematyki, można znaleźć liczby wszelkich możliwych rozmiarów, wedle upodobania. Oszałamiającego przykładu dostarcza liczba elementów pewnej struktury, słusznie nazwanej „grupą monstrum”. Wynosi ona, bagatela, 808 017 424 794 512 875 886 459 904 961 710 757 005 754 368 000 000 000.

Na wypadek gdyby czytelnikowi nie chciało się liczyć cyfr, jest to około 10^{54}[31*]. Na szczęście obecnie nigdzie w fizyce nie pojawia się liczba tego rzędu wymagająca wyjaśnienia; gdyby tak było, jestem pewna, że ktoś spróbowałby powiązać ją z grupą monstrum.

Nie możemy więc winić matematyki za nasz pociąg do niektórych liczb.

Niech czytelnik nie zrozumie mnie źle – zgadzam się, że w ogólności lepiej jest dysponować głębszym wytłumaczeniem dla każdego czynionego przez nas założenia. Nie zgadzam się tylko na sytuację, w której pewne liczby wymagają wyjaśnienia, podczas gdy przymyka się oko na inne kwestie.

Spieszę dodać, że nie jest tak, iż naturalność nie jest nigdy użyteczna. Można ją stosować, gdy znamy rozkład prawdopodobieństwa – na przykład rozkład gwiazd we wszechświecie lub rozkład fluktuacji w ośrodku. Wówczas jesteśmy w stanie określić, co jest, a co nie jest „naturalną" odległością do sąsiedniej gwiazdy, albo co jest „prawdopodobnym" zdarzeniem. A jeśli jesteśmy w posiadaniu teorii, która tak jak model standardowy przy bliższym oglądzie okazuje się zawierać liczne naturalne parametry, rozsądnie jest ekstrapolować tę obserwację i na jej podstawie formułować przewidywania. Ale jeśli przewidywania te nie zdadzą egzaminu, trzeba to odnotować i iść dalej.

W praktyce dominująca rola naturalności skutkuje tym, że nie przekona się nikogo do przeprowadzenia eksperymentu, jeśli nie przedstawi się „naturalnych" powodów, dla których nowa fizyka miałaby się pojawić w zasięgu pomiarów. Jednak w związku z tym, że naturalność ma fundamentalnie charakter estetyczny, zawsze da się sformułować nowe powody i przeliczyć wszystko od nowa. W rezultacie już od dziesięcioleci formułujemy przewidywania nowych efektów, które każdorazowo miały być mierzalne akurat w ramach nadchodzącego eksperymentu. A jeśli dany eksperyment niczego nie znajdował, przewidywania modyfikowano, aby lądowały w zasięgu kolejnego przyszłego eksperymentu.

Jest wreszcie elegancja, najbardziej nieuchwytne spośród kryteriów. Często opisuje się ją jako połączenie prostoty z zaskoczeniem, skutkujące nową wiedzą na dany temat. Elegancję dostrzegamy, przeżywając moment „aha!", doznając chwili olśnienia, kiedy wszystko nagle układa się w logiczną całość. Richard Dawid nazwał ją „niespodziewanym domknięciem eksplanacyjnym" (*unexpected explanatory closure*) – wcześniej nieprzeczuwanym związkiem między czymś pozornie niezwiązanym. Ale chodzi również o prostotę prowadzącą do złożoności, o otwarcie nowego okna na dziewiczy teren, o bogactwo struktury, która – niespodziewanie – wyrasta z oszczędnych założeń.

Elegancja jest bezwstydnie subiektywnym kryterium i choć jest wpływowa, nikt nie próbował jej formalizować i zaprzęgać do rozwijania teorii. Przynajmniej na razie. Za pierwszą taką próbę można bowiem uznać propozycję Richarda Dawida, by elegancję zdefiniować za pomocą niespodziewanego domknięcia eksplanacyjnego w ramach wysuniętej przez niego metody oceny teorii. Jednakże w stopniu, w którym chodzi o domknięcie eksplanacyjne, propozycja ta sprowadza się do żądania spójności, czego i tak wymaga się od nowych teorii. Natomiast w stopniu, w którym owo domknięcie ma być „niespodziewane", odnosi się ona do tego, na ile ludzki mózg potrafi antycypować rezultaty matematyczne przed ich udowodnieniem. Tym samym jest to wciąż subiektywne kryterium.

Piękno jest pewną kombinacją powyższych cech: prostoty, naturalności i szczypty zaskoczenia. To według tych reguł gramy. Nie chcemy przecież nikogo przesadnie zaskakiwać.

∞∞

Im bardziej usiłuję zrozumieć poleganie moich kolegów na pięknie, tym mniej sensowne mi się wydaje. Na matematycznej ścisłości opierać się nie mogę, ponieważ ona sama opiera się na arbitralnych założeniach, których dobór, sam pozbawiony ścisłości, czyni całą ideę absurdalną. Nie potrafiłam też znaleźć matematycznych podstaw dla prostoty, naturalności czy elegancji, które w ostatecznym rozrachunku przemycały z powrotem subiektywne, ludzkie wartości. Obawiam się, że stosując te kryteria, wykraczamy poza obręb nauki.

Ktoś musi rozwiać moje narastające podejrzenia, że fizycy teoretyczni padli ofiarą zbiorowych urojeń, nie mogąc lub nie chcąc dostrzec nienaukowości swojego postępowania. Muszę porozmawiać z kimś, kto doświadczył skuteczności działania tych kryteriów, co nigdy nie było moim udziałem. Tak się składa, że znam odpowiednią osobę.

Hodowca koni

Jest styczeń, Austin w Teksasie. Tak bardzo boję się spóźnić, że na swoje spotkanie ze Stevenem Weinbergiem przyjeżdżam o godzinę za wcześnie. W sam raz na bardzo dużą kawę. Gdy jestem w połowie kubka, podchodzi do mnie młody mężczyzna i pyta, czy może się dosiąść. Pewnie, odpowiadam. Kładzie na stole wielką księgę i zaczyna przedzierać się przez tekst, robiąc notatki. Zerkam na równania. To mechanika klasyczna, sam początek pierwszego semestru fizyki teoretycznej.

Obok, rozmawiając, przechodzi tłumek studentów. Pytam pilnego młodzieńca, czy wie może, z jakiego wykładu wyszli. „Nie, niestety”, odpowiada i dodaje, że jest tu dopiero od dwóch tygodni. Pytam go, czy już zdecydował, w którym obszarze fizyki chciałby się specjalizować. Mówi, że przeczytał książki Briana Greene’a i bardzo interesuje go teoria strun. Ja mu na to, że teoria strun to nie jedyna opcja, że fizyka nie jest matematyką

i że sama logika nie wystarczy, by znaleźć właściwą teorię. Ale nie sądzę, by moje słowa znaczyły wiele wobec słów Greene'a.

Daję chłopakowi swój adres e-mail, po czym wstaję i ruszam bezokiennym korytarzem, mijając wyblakłe plakaty konferencyjne i ogłoszenia o seminariach, aż natrafiam na drzwi opatrzone tabliczką z napisem „Prof. Steven Weinberg". Zaglądam do środka, ale profesora jeszcze nie ma. Jego sekretarka ignoruje mnie, więc czekam, gapiąc się na swoje stopy, aż wreszcie słyszę kroki na korytarzu.

– Mam teraz umówioną rozmowę z pisarzem – mówi Weinberg, rozglądając się, ale nikogo poza mną nie ma. – Czy to pani?

Jak zawsze gotowa na nową okazję, by móc poczuć się zupełnie nie na miejscu, odpowiadam, że owszem, myśląc sobie, że nie powinnam tu być; że powinnam siedzieć przy swoim biurku i czytać artykuł, wypełniać wniosek grantowy albo przynajmniej pisać recenzję. Nie powinnam bawić się w psychoanalizę społeczności, która ani nie potrzebuje, ani nie życzy sobie terapii. I nie powinnam udawać kogoś, kim nie jestem.

Weinberg podnosi brew i zaprasza mnie do swojego gabinetu.

Jak się okazuje, jego gabinet jest dwa razy mniejszy od mojego – ta obserwacja doszczętnie rozwiewa resztki moich dawnych ambicji zdobycia Nagrody Nobla. Rzecz jasna nie mam na swojej ścianie tylu honorowych tytułów. Nie mam też na biurku swoich własnych książek ustawionych w rządek. Weinberg właśnie dobił do tuzina.

Jego *Gravitation and Cosmology* [Grawitacja i kosmologia] była pierwszym kupionym przeze mnie podręcznikiem. Była to tak szokująco droga książka, że przez większość roku targałam ją ze sobą wszędzie w obawie, że gdzieś mi się zawieruszy. Chadzałam z nią na siłownię. Jadałam nad nią. Sypiałam z nią. Nawet ją w końcu otworzyłam.

To księga o prostej, granatowej okładce z wytłoczonym na złoto tytułem i nazwiskiem autora; zasadniczo aż się prosi o warstwę kurzu. Proszę sobie wyobrazić moje podekscytowanie, gdy dowiedziałam się, że autor wciąż żyje i wcale nie jest, jak zakładałam, dawno zmarłym kolegą Einsteina i Heisenberga, spod pióra których wyszła większość moich dotychczasowych lektur. Ba, nie tylko był żywy, ale w nadchodzących latach miał opublikować podręcznik do kwantowej teorii pola w trzech tomach. Z nimi też sypiałam.

Weinberg, obecnie osiemdziesięciokilkulatek, wciąż uprawia naukę i wciąż pisze książki – właśnie wychodzi najnowsza[32*]. Jeśli ktokolwiek na tej planecie jest mi w stanie wyjaśnić, dlaczego powinnam polegać w swoich badaniach na pięknie i naturalności, to jest to właśnie on. Sięgam po swój notatnik i usadawiam się z nadzieją, że wyglądam wystarczająco pisarsko.

Włączając dyktafon, myślę sobie, że wreszcie będę mogła zapytać o tego cholernego hodowcę koni.

– Przedstawił pan kiedyś słynną analogię z hodowcą koni. Wydaje się ona sugerować, że zwracanie uwagi na piękno w procesie budowania teorii opiera się na doświadczeniu, czy tak?

– Sądzę, że tak – mówi Weinberg. – Jeśli cofniemy się do starożytnych Greków, aż do czasów Arystotelesa...

Mówiono mi, że Weinberg nie tyle rozmawia z kimś, ile *mówi do* kogoś. Teraz rozumiem, o co chodziło. I proszę mi wierzyć, człowiek ten opowiada, jakby recytował tekst książki; nic, tylko spisać i wydać.

– Jeśli cofniemy się do starożytnych Greków, aż do czasów Arystotelesa, okaże się, że w swoim mniemaniu dysponowali wrodzonym poczuciem słuszności, także w znaczeniu słuszności moralnej. Na przykład Parmenides sformułował niesłychanie prostą teorię, według której w przyrodzie nic się nigdy nie zmienia. Co prawda doświadczenie temu przeczy, ale Parmenides

nie zaprzątał sobie głowy uzgadnianiem swojej teorii niezmienności z tym, co obserwujemy na co dzień. Wysunął tę teorię wyłącznie na gruncie prostoty i elegancji oraz, jak sądzę, rodzaju snobizmu, który każe uważać zmianę za mniej doskonałą od trwałości. Od tego czasu paru rzeczy się nauczyliśmy. Rozumiemy już, że jakiekolwiek teorie byłyby podsuwane przez nasze wyobrażenia na temat estetyki, musimy je jakoś konfrontować z empirią. W miarę upływu lat nauczyliśmy się nie tylko tego, że teorie sugerowane przez nasze poczucie piękna należy potwierdzać doświadczalnie, lecz również tego, że nasze poczucie piękna stopniowo zmienia się w sposób kształtowany przez doświadczenie. Dla przykładu, cudowna koncepcja holistycznego patrzenia na przyrodę, głosząca, iż te same wartości, które wpływają na ludzkie życie: miłość, nienawiść, walka, sprawiedliwość i tak dalej, można też odnosić do świata nieożywionego; ów holistyczny obraz natury, którego wyrazem jest astrologia, a zgodnie z nią to, co dzieje się w niebiosach, ma bezpośrednie przełożenie na ludzkie sprawy – to wszystko uważano za bardzo eleganckie, to była taka zunifikowana teoria wszystkiego. Ale nauczyliśmy się ją odrzucać. Nie doszukujemy się już ludzkich wartości w prawach przyrody. Nie rozprawiamy o szlachetności cząstek elementarnych albo o tym, że rozpraszanie w reakcji jądrowej przebiega tak, by osiągnąć „sprawiedliwy” rezultat w rozumieniu Anaksymandra. Nasze poczucie piękna uległo zmianie. Jak to opisałem w swojej książce, piękno, którego obecnie poszukujemy, ale nie w sztuce czy w wystroju wnętrz (i nie w koniach wyścigowych!), tylko w teoriach fizycznych, wiąże się z ich sztywnością, nieuniknionością. Szukamy teorii odznaczających się tym, że nie będzie się dało ich modyfikować bez doprowadzania do absurdów, takich jak niespójności matematyczne. Przykładowo, we współczesnym modelu standardowym cząstek elementarnych mamy sześć rodzajów kwarków i sześć rodzajów leptonów[33*].

Czyli po tyle samo. Można uznać, że taka odpowiedniość jest całkiem ładna. Ale naprawdę eleganckie jest to, że gdyby takiej wzajemnej odpowiedniości *nie było*, model nie byłby matematycznie spójny. W równaniach pojawiłby się problem zwany fachowo anomalią, który prowadziłby do niespójności. Ogólny formalizm modelu standardowego wymusza równą liczbę kwarków i leptonów. Uważamy to za piękne choćby dlatego, że czyni zadość naszemu pragnieniu wyjaśnienia. Wiedząc, że istnieje sześć typów kwarków, potrafimy pojąć, dlaczego istnieje również sześć typów leptonów. Ale czyni to również zadość naszemu przeświadczeniu, że to, z czym się mierzymy, jest niemal nieuniknione. Teoria, którą dysponujemy, wyjaśnia się sama. Nie robi tego całkowicie, nie wiemy bowiem, czemu pojawia się tu liczba sześć, a nie cztery, dwanaście lub jakakolwiek inna liczba parzysta, ale do pewnego stopnia teoria jest samowyjaśnialna w terminach matematycznej spójności. A to jest coś cudownego, bo prowadzi nas krok dalej w wyjaśnianiu świata, by posłużyć się tytułem mojej najnowszej książki[5].

Krótko mówiąc, Weinberg stwierdza, że jesteśmy obecnie o wiele mądrzejsi od naszych poprzedników, ponieważ matematyka chroni nas przed czynieniem mglistych lub wzajemnie sprzecznych założeń. W jego opowieści fizycy teoretycy są naukowymi półbogami, coraz bardziej zbliżającymi się do zrealizowania snu o teorii ostatecznej[34*]. Och, jakże chciałabym w to wierzyć! Ale nie potrafię. A skoro to mój kryzys wiary mnie tu przywiódł, zgłaszam sprzeciw wobec idei teorii, która sama się wyjaśnia.

– Ale przecież spójność matematyczna to dosyć słaby wymóg – mówię. – Istnieje wiele matematycznie spójnych konstrukcji, które nijak się mają do świata.

– Tak, to prawda – odpowiada Weinberg. – I zgaduję, że spójność matematyczna koniec końców nie będzie wystarczająco

silnym warunkiem, by wyłonić jedyną możliwą teorię. Sądzę, że najlepsze, na co możemy liczyć, to teoria, która jako jedyna będzie matematycznie spójna i równocześnie bogata, kryjąca w swoim bogactwie całe mnóstwo zjawisk i w szczególności dopuszczająca powstanie życia. Widzi pani – ciągnie – z pewnością ma pani rację, że sama spójność matematyczna nie wystarczy, bo możemy formułować matematycznie poprawne teorie, które z całą pewnością nie opisują rzeczywistego świata. Takie jak teoria z jedną jedyną cząstką, która z niczym nie oddziałuje, tylko siedzi sobie w pustej przestrzeni i nic się nigdy z nią nie dzieje. Z punktu widzenia matematyki taka teoria jest spójna. Nie jest ona jednak ani zbyt interesująca, ani bogata. Być może naszym światem rządzi jedyna matematycznie spójna teoria, która dopuszcza w nim różnorodność, wielość zjawisk i urozmaicenie historii. Jest to jednak bardzo daleko idąca spekulacja.

Wyobraźmy sobie, że to prawda i że się nam udało. Wyobraźmy sobie, że fizycy teoretycy udowodnili, że istnieje tylko jedno, ostateczne prawo przyrody, które mogło nas zrodzić. Wszystko wreszcie miałoby sens: gwiazdy i planety, światło i ciemność, życie i śmierć. Znalibyśmy przyczyny wszystkich pozornie przypadkowych zdarzeń, rozumielibyśmy, że nic nie mogłoby potoczyć się inaczej, ani lepiej, ani gorzej. Bylibyśmy na równi z naturą; moglibyśmy spojrzeć na wszechświat i powiedzieć: „Rozumiem”.

Chodzi tu o odwieczne pragnienie, by odszukać sens w czymś pozornie bezsensownym. Ale nie tylko o to. Uzbrojeni w takie przełomowe odkrycie, fizycy teoretycy staliby się arbitrami prawdy. Mając w ręku klucz do wszelkich praw przyrody, zajęliby się pozostałymi działami nauki, wydobywając prawdę z mroków tajemnicy. Zmieniliby świat. Byliby bohaterami. I wreszcie potrafiliby obliczyć masę bozonu Higgsa.

Potrafię zrozumieć urok takiej wizji. Nie potrafię jednak zrozumieć, czemu poszukiwanie jedynie możliwego prawa przyrody miałoby być czymś więcej niż mrzonką. Nie sądzę też, by w pogoni za nią naturalność była szczególnie przydatna. A jaka jest alternatywa? Weinberg wyraził nadzieję, że istnieje tylko jedna „matematycznie spójna teoria, która dopuszcza różnorodność w świecie". Ale nietrudno o spójną teorię, która nie będzie w konflikcie z obserwacjami: wystarczy, by nie formułowała przewidywań. Myślę, że pewnie nie o to mu chodziło, więc zauważam:

– To jednak wymaga, by z takiej teorii dawało się wyprowadzić parametry niezbędne do zaistnienia złożonej fizyki atomowej i jądrowej.

– Tego nie wiem – mówi Weinberg, wzruszając ramionami. – Może być też tak, że właściwa teoria dopuszcza ogromną liczbę różniących się między sobą wielkich wybuchów, którym udaje się wyjść z najwcześniejszych faz ewolucji. Te różne wielkie wybuchy, wszystkie dziejące się równocześnie, odznaczają się bardzo różnymi stałymi przyrody, których wartości nigdy nie będziemy mogli przewidzieć, bo cokolwiek byśmy na ich temat stwierdzili, odnosić się to będzie wyłącznie do naszego Wielkiego Wybuchu. To byłoby tak, jakbyśmy próbowali wyprowadzić z pierwszych zasad odległość Ziemi od Słońca. Tymczasem wiemy przecież, że istnieją miliardy planet krążących w najróżniejszych odległościach od swoich gwiazd, i nie możemy oczekiwać, że uda się przewidzieć tego typu rzeczy. Podobnie może się okazać, że jest nieograniczona liczba wielkich wybuchów. Wówczas stałe przyrody mają takie wartości, jakie mają, bo takie im się akurat przytrafiły w zamieszkiwanym przez nas Wielkim Wybuchu. To wszystko szalone spekulacje – mówi Weinberg. – Nie wiemy, czy cokolwiek z tego jest prawdą. Jednak z pewnością jest to logicznie możliwe. Istnieją teorie fizyczne, według których tak właśnie jest.

Niekończące się możliwości

Jesteś jednym spośród około 7 miliardów ludzi na tej planecie; twoje Słońce to jedna ze 100 miliardów gwiazd w Drodze Mlecznej; Droga Mleczna to jedna z około 100 miliardów galaktyk we wszechświecie. Być może istnieją inne wszechświaty, które razem tworzą tak zwany wieloświat. Nie brzmi aż tak niewiarygodnie? To obecnie najbardziej kontrowersyjna idea w fizyce.

Kosmolog Paul Steinhardt nazywa ideę wieloświata „barokową, nienaturalną, niesprawdzalną i wreszcie niebezpieczną dla nauki i społeczeństwa”[6]. Według Paula Daviesa jest to „po prostu naiwny deizm obleczony w naukowy żargon”[7]. George Ellis przestrzega, że „zwolennicy idei wieloświata [...] milcząco modyfikują to, co rozumiemy przez naukę”[8]. David Gross stwierdza, że „zalatuje od niej aniołami”[9]. Dla Neila Turoka idea ta stanowi „ostateczną katastrofę”[10]. Natomiast dziennikarz naukowy John Horgan narzeka, że „teorie wieloświata nie są teoriami – to science fiction, to teologia, to wytwory wyobraźni nieskrępowanej dowodami”[11].

Po drugiej stronie sporu mamy Leonarda Susskinda, według którego to „ekscytujące myśleć, że wszechświat może być znacznie większy, bogatszy i [bardziej] różnorodny, niż kiedykolwiek sądziliśmy”[12]. Bernard Carr rozumuje, że „pojęcie wieloświata pociąga za sobą nowe spojrzenie na naturę nauki i nic dziwnego, że wywołuje intelektualny dyskomfort”[13]. Max Tegmark przekonuje, że przeciwnicy tej idei są „emocjonalnie uprzedzeni do usuwania nas samych z głównej sceny”[14]. Z kolei Tom Siegfried uważa, że krytycy prezentują „takie samo nastawienie, które nakazywało niektórym dziewiętnastowiecznym naukowcom i filozofom zaprzeczać istnieniu atomów”[15]. Auć.

O co tyle szumu? Chodzi o to, że zgodnie z tym, czego nauczył nas Einstein, nic nie może poruszać się szybciej niż światło

w próżni. Wynika stąd, że w każdej chwili prędkość światła wyznacza granicę zasięgu naszych obserwacji, znaną jako „horyzont kosmologiczny". Poza światłem wszystko rozchodzi się albo wolniej, albo – w przypadku samej grawitacji – tak samo szybko jak ono. A zatem jeśli jakiś obiekt znajduje się tak daleko, że jego światło nie mogło jeszcze do nas dotrzeć, nie bylibyśmy w stanie stwierdzić, że w ogóle tam jest.

O ile jednak nic nie może przemierzać przestrzeni szybciej niż światło, ograniczenie to nie dotyczy samej przestrzeni. Ta ostatnia może rozszerzać się szybciej i w myśl idei wieloświata faktycznie to robi, w związku z czym istnieją obszary, z których światło nigdy do nas nie dotrze. Wszystkie inne wszechświaty w wieloświecie leżą właśnie w takich obszarach i jako takie są od nas przyczynowo oddzielone. Są na zawsze poza naszym zasięgiem. Oznacza to, jak zauważają przeciwnicy wieloświata, że nie da się go w żaden sposób zaobserwować, a zatem jest on poza domeną nauki.

W odpowiedzi zwolennicy idei wieloświata zwracają uwagę, iż z faktu, że jakaś teoria zawiera elementy nieobserwowalne, nie wynika jeszcze, że nie dostarcza przewidywań. Od czasu powstania mechaniki kwantowej wiemy już, że nie należy wymagać, by wszystkie struktury matematyczne danej teorii odpowiadały obserwowalnym wielkościom. Przykładowo, funkcje falowe same w sobie nie są mierzalne; pomiarom podlegają jedynie rozkłady prawdopodobieństwa otrzymywane z funkcji falowych. Nie każdy jest zadowolony z tego stanu rzeczy. Jednak niezależnie od tego wszyscy są zgodni, że mechanika kwantowa sprawdza się świetnie.

To, w jakim stopniu fizycy są skłonni uznać konieczność nieobserwowalnych komponentów jakiejś teorii, zależy od pokładanego w niej zaufania oraz nadziei uzyskania dzięki niej

głębszego zrozumienia. Ale nie ma nic *a priori* nienaukowego w teorii z elementami niedającymi się obserwować.

Mimo iż większość wieloświata jest nieobserwowalna, jego istnienie może dostarczać przewidywań, wynikających z badania prawdopodobieństwa tego, że jakiś wszechświat w wieloświecie odznacza się takimi prawami przyrody jak nasze. W takiej sytuacji nie da się wyprowadzić fundamentalnych praw rządzących naszym wszechświatem, ale być może da się określić, jakie prawa są najbardziej prawdopodobne. Według zwolenników tej idei to najlepsze, co możemy osiągnąć. Mamy tu do czynienia ze zmianą paradygmatu, innym spojrzeniem na to, co w ogóle należy rozumieć przez stwierdzenie naukowe. Jeśli ktoś tego nie kupuje, jeśli nie akceptuje nowej nauki, to blokuje postęp i jest beznadziejnie zapóźnioną skamieliną, która tyko czeka na pokrycie osadem.

Przeciwnicy odpowiadają na to, że w wieloświecie nie da się obliczać prawdopodobieństw, bo wszystkie możliwości realizują się w nim nieskończenie wiele razy, a nie da się tak po prostu porównywać jednych nieskończoności z drugimi. Można tego dokonać, ale trzeba w tym celu użyć pewnego matematycznego narzędzia – rozkładu prawdopodobieństwa albo „miary" – które mówi, jak okiełznać te nieskończoności. Skąd jednak wziąć taki rozkład prawdopodobieństwa? Do tego potrzebna jest kolejna teoria, więc w tym momencie równie dobrze można poszukać takiej, która w ogóle nie produkuje tych wszystkich nieobserwowalnych wszechświatów.

Wieloświat nie jest opcjonalny, odpowiadają jego zwolennicy. Jeśli żyjemy w najlepszym z możliwych światów, to co z całą resztą możliwych światów? Nie można ich po prostu zignorować. Nie wymyśliliśmy tego, mówią; nasze teorie to na nas wymuszają. To nie my; to matematyka nam kazała. A ona nie kłamie. My tylko jesteśmy obiektywnymi, dobrymi naukowcami, mówią. Jeśli ktoś

sprzeciwia się tym ustaleniom, to po prostu odmawia przyjęcia do wiadomości niewygodnych, logicznych konsekwencji.

I tak to się toczy od dwóch dekad.

∞∞

Nie mamy powodów przypuszczać, że wszechświat kończy się za horyzontem kosmologicznym i że począwszy od jutra, okaże się, że nie ma już żadnych galaktyk poza naszym dzisiejszym zasięgiem obserwacji. Nikt natomiast nie wie – nikt nie może wiedzieć – jak daleko ciągnie się rozkład galaktyk podobnych do tych z naszego bezpośredniego sąsiedztwa. Nie wiemy nawet, czy przestrzeń rozciąga się w nieskończoność, czy też zawija się w sobie, tworząc skończony, zamknięty wszechświat o promieniu znacznie większym niż to, co obecnie widzimy.

Tego typu ciąg dalszy znanego nam wszechświata nie jest przedmiotem kontrowersji i zazwyczaj nie to mamy na myśli, mówiąc o „wieloświecie". Właściwie rozumiany wieloświat zawiera w sobie regiony, które w niczym nie przypominają tego, co obserwujemy dookoła. Istnieją różne rodzaje wieloświatów, co do których dzisiejsi fizycy teoretycy są przekonani, że stanowią logiczne konsekwencje ich teorii:

1. Wieczna inflacja

Nasze rozumienie wczesnego wszechświata jest ograniczone, ponieważ nie wiemy zbyt wiele o zachowaniu się materii w temperaturach i gęstościach wykraczających poza zakres, który dotychczas udało się przebadać. Możemy jednak ekstrapolować nasze teorie – model standardowy oraz standardowy model kosmologiczny – zakładając, że działały tak samo jak dotąd. Przy czym ekstrapolując znaną fizykę materii na coraz wcześniejsze fazy ewolucji wszechświata, musimy równocześnie ekstrapolować znaną fizykę czasoprzestrzeni.

Obecnie najpowszechniej przyjmowana ekstrapolacja w przeszłość głosi, iż wszechświat w pewnym momencie przeszedł przez szybką fazę

ekspansji, zwaną inflacją. Była ona spowodowana nowym polem – inflatonem[35*] – które przyspieszyło rozszerzanie się wszechświata. Pod wpływem inflatonu przestrzeń pęcznieje jak za sprawą ciemnej energii, tyle że znacznie szybciej. Wraz z końcem inflacji energia inflatonu zamieniła się w cząstki modelu standardowego i ciemnej materii. Odtąd historia wszechświata przebiegała tak, jak to omówiliśmy w rozdziale 4.

Istnieją pewne przesłanki na rzecz scenariusza inflacyjnego, ale nie są one niepodważalne. Nie przeszkodziło to fizykom dokonać ekstrapolacji tej ekstrapolacji w formie tak zwanej teorii wiecznej inflacji. Według niej nasz rodzimy wszechświat jest tylko małym zakątkiem znacznie większej – w istocie nieskończenie wielkiej – przestrzeni znajdującej się w fazie inflacji, która będzie trwać wiecznie. Ponieważ jednak w inflatonie pojawiają się kwantowe fluktuacje, mogą w nim pojawiać się bąble, w których inflacja zamiera, a jeśli taki bąbel osiągnie wystarczająco duże rozmiary, mogą w nim powstać galaktyki. Nasz wszechświat znajduje się wewnątrz takiego bąbla. Poza nim przestrzeń wciąż pęcznieje inflacyjnie, a przypadkowe fluktuacje kwantowe rodzą kolejne wszechświaty-bąble – i tak bez końca. Bąble te składają się na wieloświat. Według zwolenników tej teorii – jeśli uznać jej poprawność – inne wszechświaty muszą być równie prawdziwe jak nasz.

Idea wiecznej inflacji jest niemal tak stara jak sama inflacja; pojawiła się w 1983 roku jako niezamierzony efekt pierwszych modeli inflacyjnych[16]. Jednak wieczna inflacja pozostała szerzej nieznana aż do połowy lat dziewięćdziesiątych, kiedy to jej przydatność odkryli teoretycy strun. Dzisiaj większość badanych modeli inflacyjnych prowadzi do wieloświata, aczkolwiek nie wszystkie[17].

W wieloświecie wiecznej inflacji, wobec nieskończonej liczby bąbli bezustannie wyłaniających się z losowych fluktuacji kwantowych, wszystko, co tylko może się zdarzyć, w końcu się zdarzy. Oznacza to, że wieczna inflacja skutkuje istnieniem wszechświatów, w których historia ludzkości przebiega na każdy dopuszczalny przez prawa przyrody sposób. W niektórych z nich będzie to dla ciebie brzmieć sensownie.

2. Krajobraz teorii strun

Fizycy zajmujący się teorią strun mieli nadzieję odkryć formalizm, który zawierałby w sobie zarówno model standardowy, jak i ogólną teorię względności. Jednak od późnych lat osiemdziesiątych zaczęło się stawać coraz bardziej jasne, że teoria ta nie potrafi przewidzieć zestawu cząstek,

pól i parametrów składających się na model standardowy. Zamiast tego teoria strun roztacza cały krajobraz możliwości. Każdy punkt tego krajobrazu odpowiada innej wersji teorii z różnymi cząstkami, parametrami i prawami przyrody.

Jeśli ktoś uważa teorię strun za ostateczną, to ten brak mocy predykcyjnej stanowi duży problem: oznacza on, że teoria ta nie jest w stanie wyjaśnić, dlaczego obserwujemy akurat taki wszechświat, a nie inny. Aby więc uratować stwierdzenie o ostateczności tej teorii w obliczu jej predykcyjnego wybrakowania, teoretycy strun zmuszeni byli przyjąć pogląd, iż wszystkie wszechświaty w krajobrazie mają takie samo prawo do istnienia jak nasz. W konsekwencji żyjemy w wieloświecie. Krajobraz teorii strun gładko połączył się z wieczną inflacją.

3. Wiele światów

Istnieje wariant mechaniki kwantowej (więcej o niej w rozdziale 6) znany jako interpretacja wielu światów. W myśl tej interpretacji nie jest tak, że realizacji podlega tylko jeden z możliwych wyników eksperymentu, dla których mechanika kwantowa dostarcza prawdopodobieństw, lecz w istocie realizują się wszystkie wyniki, każdy w swoim własnym wszechświecie. Otrzymujemy taki obraz rzeczywistości poprzez usunięcie założenia, iż w procesie pomiaru w mechanice kwantowej wyróżniony zostaje pojedynczy rezultat. Ponownie widzimy, że poleganie na matematyce w połączeniu z pragnieniem prostoty prowadzi do wielości uniwersów.

Interpretacja wielu światów mechaniki kwantowej jest czymś odrębnym od krajobrazu różnych wszechświatów, albowiem z istnienia wielu światów nie wynika jeszcze, że będą się one różniły typami cząstek. Można wręcz połączyć te dwa sposoby rozumienia wieloświata w jeden większy konstrukt[18].

4. Matematyczny wszechświat

W hipotezie matematycznego wszechświata argument z ostateczności teorii osiąga swoją skrajną postać. Ponieważ dowolna teoria opisująca nasz świat wiąże się z wyborem pewnych struktur matematycznych spośród ogółu matematyki, teoria ostateczna nie może wymagać takiego wyboru, albowiem w celu jego uzasadnienia trzeba by było odwołać się do kolejnej teorii. Płynie stąd logiczny wniosek, iż jedyną możliwą teorią ostateczną jest taka, w myśl której cała matematyka ma udział

w istnieniu. W tak rozumianym wieloświecie pierwiastek kwadratowy z −1 bywa równie rzeczywisty jak ty czy ja.

Idea matematycznego wszechświata, głosząca równoprawne istnienie wszystkich matematycznie możliwych struktur, została wysunięta przez Maxa Tegmarka w 2007 roku[19]. Zawiera w sobie wszystkie inne typy wieloświatów. Choć cieszy się pewną popularnością wśród filozofów, została zignorowana przez większość fizyków.

Powyższa lista może wywołać wrażenie, że wieloświat jest czymś nowym, ale jedyna nowość polega tu na tym, że fizycy zaczęli uparcie wierzyć w jego istnienie. Każda teoria wymaga danych obserwacyjnych, aby określić wartości parametrów lub dobrać aksjomaty, w związku z czym brak takich danych każdorazowo prowadzi do wieloświata. Wówczas można bowiem stwierdzić: cóż, widocznie wszystkie możliwości są równoprawne, a zatem istnieją w ramach wieloświata. Jeśli celem jest teoria, która potrafi wyjaśnić wszystko z niczego, to jej przewidywania muszą w końcu stawać się wieloznaczne – a to w nieunikniony sposób prowadzi do wieloświata.

Taki na przykład Newton mógłby nie poprzestać na zmierzeniu stałej grawitacyjnej[36*] i argumentować, że dla każdej możliwej wartości istnieje osobny wszechświat. Einstein mógłby twierdzić, że wszystkie rozwiązania równań ogólnej teorii względności muszą być realizowane gdzieś w wieloświecie. Można stworzyć wieloświat na bazie dowolnej teorii – wystarczy tylko odrzucić wystarczającą liczbę założeń lub związków z obserwacjami.

Obecna moda na wieloświat ma więc swoje źródła w tym, że niektórych fizyków nie zadowala już teoria, która tłumaczy wyniki obserwacji. Usiłując prześcignąć samych siebie, pozbywają się zbyt wielu założeń, a kiedy ich teorie osiągają kres swoich możliwości eksplanacyjnych, wyciągają z nich wniosek, że żyjemy w wieloświecie.

Ale może jestem skamieliną, która tyko czeka na pokrycie osadem.

Nauka ma na celu opisanie naszych obserwacji przyrody, ale bywa, że przewidywania danej teorii wykluwają się po długim okresie inkubacji. W związku z tym zgadzam się, że traktowanie wieloświatów poważnie, a nie tylko jak matematycznych artefaktów, za które je uważam, może w przyszłości doprowadzić do nowych odkryć. Kwestia sprowadza się zatem do tego, na ile prawdopodobne są nowe odkrycia dzięki takiemu podejściu, a to cofa nas do problemu, od którego zaczęliśmy całą naszą wycieczkę: jak ocenić, czy dana teoria jest obiecująca, jeśli nie dysponujemy dowodami obserwacyjnymi, które by za nią przemawiały?

Nie wszystkie warianty wieloświata są całkowicie niesprawdzalne. Przykładowo, w ramach wiecznej inflacji nasz wszechświat mógł w przeszłości zderzyć się z innym wszechświatem i taka „kolizja bąbli" mogła odcisnąć obserwowalne piętno na mikrofalowym promieniowaniu tła. Poszukiwano go już, lecz niczego nie znaleziono. Nie wyklucza to jeszcze wieloświata, ale dowodzi, że nie doszło do takiej kolizji.

Inni fizycy argumentowali, że niektóre warianty wieloświata mogą skutkować pewnym szczególnym rozkładem małych czarnych dziur w naszym wszechświecie. Ma to konsekwencje, które wkrótce może dać się zaobserwować[20]. Ale przewidywania oparte na idei wieloświata, które okażą się chybione, znaczą tylko tyle, że trzeba rozważać takie rozkłady prawdopodobieństwa, które czynią niezaobserwowany efekt mało prawdopodobnym. Takie podejście do kosmologii jest równie obiecujące jak próba zrozumienia *Wojny i pokoju* przez systematyczne odrzucanie innych książek. Co jednak godne pochwały, fizycy ci przynajmniej próbują poddać ideę wieloświata doświadczalnemu sprawdzianowi.

Istniejące przewidywania pokazują, że hipoteza wieloświata może dać się weryfikować eksperymentalnie, ale odnosi się to wyłącznie do bardzo specyficznych scenariuszy. Ogromna większość wariantów wieloświata jest obecnie nieweryfikowalna i pozostanie taka na zawsze.

Nie mogąc nawet w zasadzie przetestować swoich idei, niektórzy fizycy teoretycy postanowili zastosować alternatywną metodę oceny teorii: zakłady. Kosmolog Martin Rees zakłada się o swojego psa, że hipoteza wieloświata jest prawdziwa, Andrei Linde stawia na szali własne życie, a Steven Weinberg miał „akurat tyle pewności co do wieloświata, by założyć się *zarówno* o życie Andreia Lindego, jak i o psa Martina Reesa”[21].

Kosmiczny poker

Wieloświat zyskał na popularności, podczas gdy naturalność boryka się z problemami, toteż fizycy obecnie lansują tę pierwszą hipotezę jako alternatywę dla drugiej. Jeśli nie potrafimy znaleźć naturalnego wyjaśnienia dla jakiegoś parametru, to – jak przekonują – takie wyjaśnienie nie istnieje. Z kolei samodzielne określanie wartości parametru jest nieeleganckie. A zatem, skoro parametr nie jest naturalny, to widocznie każda jego wartość jest równoprawna i dla każdej istnieje osobny wszechświat. Prowadzi to do dziwacznego wniosku, że jeśli w LHC nie odkryjemy cząstek supersymetrycznych, to żyjemy w wieloświecie.

Nie mogę uwierzyć w to, co stało się z tą niegdyś poważaną profesją. Dawniej fizycy teoretycy tłumaczyli to, co zaobserwowano. Teraz usiłują tłumaczyć, dlaczego nie potrafią wytłumaczyć, że czegoś nie zaobserwowano. I nawet z tym sobie nie radzą. Żyjąc w wieloświecie, nie da się wyjaśnić wartości parametrów; można co najwyżej szacować ich prawdopodobieństwo. Ale nie wyjaśniać czegoś można na wiele sposobów.

– No dobrze – mówię do Weinberga – ale zakładając, że żyjemy w wieloświecie, czy to nie jest pusty wymóg, by teoria była wystarczająco ciekawa albo prowadziła do wystarczająco ciekawej fizyki? Przecież to samo można by odnieść do jakiejkolwiek teorii, która nie przewiduje wartości parametrów.

– Nie no, jakichś przewidywań musi dostarczać – odpowiada Weinberg. – Nawet jeśli nie będą to wartości parametrów, mogą to być korelacje między nimi. Albo powiedzmy, że uda się przewidzieć wartości parametrów w ramach jakiejś teorii, czegoś w rodzaju modelu standardowego, tyle że silniejszego, zadającego masę elektronu i tak dalej, tak że na pytanie „Skąd wiadomo, że ta teoria jest poprawna?" jedyną odpowiedzią będzie „Cóż, doszliśmy najdalej, jak to możliwe, dalej już się nie da".

Po chwili kontynuuje:

– Nie rozpędzałbym się z określaniem szczegółowych warunków, jakie musi spełniać dobra teoria. Na pewno jednak potrafię stwierdzić, czym musi odznaczać się *lepsza* teoria. Teoria lepsza od modelu standardowego to taka, w ramach której czymś nieuniknionym byłoby istnienie sześciu kwarków i leptonów, a nie ośmiu lub czterech. W modelu standardowym jest sporo rzeczy, które wydają się arbitralne, w związku z czym lepsza teoria powinna tę arbitralność albo zmniejszać, albo zupełnie likwidować. Nie wiemy jednak, jak daleko da się iść w tym kierunku – ciągnie. – Nie wiem, na ile da się ulepszyć fizykę cząstek elementarnych ponad to, co mamy obecnie. Po prostu nie wiem. Sądzę, że należy próbować i przeprowadzać kolejne eksperymenty, budować kolejne urządzenia... Ale nie wiem, dokąd nas to zaprowadzi. Mam nadzieję, że nie skończy się na tym, gdzie jesteśmy teraz. Bo nie do końca mnie to satysfakcjonuje.

– Czy dane, które ostatnio napłynęły z LHC, zmieniły pana zdanie odnośnie do tego, jak wygląda taka lepsza teoria? – pytam.

– Niestety nie – odpowiada Weinberg. – To było ogromne rozczarowanie. Dane sugerują co prawda, że jakaś nowa fizyka może pojawiać się przy energiach sześciokrotnie większych od masy cząstki Higgsa[37*]. I to by było cudowne. Mieliśmy jednak nadzieję, że LHC ujawni coś istotnie nowego. Że nie będzie tylko dostarczać kolejnych potwierdzeń modelu standardowego, lecz natknie się na ślady ciemnej materii, supersymetrii albo czegoś, co doprowadziłoby do kolejnego wielkiego kroku w fizyce fundamentalnej. Tak się nie stało.

– W moim rozumieniu – mówię – nadzieje na to, że LHC odkryje coś nowego, w dużym stopniu opierały się na argumentach z naturalności, według których, jeśli masa Higgsa ma być naturalna, w zasięgu eksperymentu powinna też leżeć nowa fizyka.

– Nie traktuję poważnie żadnego negatywnego wniosku, jakoby z faktu, iż LHC nie wykrył niczego wykraczającego poza model standardowy, wynikało, że nigdy nie uda się rozwiązać problemów z naturalnością. Możemy jedynie wykluczać pewne konkretne teorie, a że nie są one szczególnie atrakcyjne, to nie można mówić, że obalenie którejś z nich stanowi jakieś wielkie dokonanie. Supersymetria nie została obalona, bo jest zbyt nieprecyzyjna w swoich przewidywaniach.

– Jeśli istnieje teoria fundamentalna, to czy uważa pan, że musi być naturalna? – pytam.

– Tak – mówi Weinberg – bo gdyby nie była, nie bylibyśmy nią zainteresowani. – I tłumaczy: – Mówiąc o naturalności, nie mam na myśli jakiejś technicznej definicji fizyków cząstek usiłujących narzucić więzy istniejącym teoriom. Przez naturalność rozumiem brak zupełnie niespodziewanych równości lub olbrzymich stosunków liczbowych.

Po krótkim milczeniu kontynuuje:

– Ale być może odpowiedziałem za szybko, mówiąc, że dobra teoria powinna być naturalna, albowiem niektóre rzeczy mogą pozostawiać w jej ramach niewyjaśnione, mogą stanowić czysto przygodne cechy naszego zakątka wieloświata. Podobnie astronomowie uważali kiedyś, że dobra teoria Układu Słonecznego to taka, w której położenia Merkurego, Marsa i Wenus są naturalne. Kepler usiłował nawet skonstruować tego typu teorię opartą na geometrycznym obrazie wykorzystującym bryły platońskie. Dziś wiemy już, że nie ma co szukać takiej teorii, bo w odległościach planet od Słońca nie ma nic naturalnego: są tam, gdzie są, w wyniku serii przypadkowych zdarzeń.

Z drugiej strony, dodaje, istnieją takie kwestie...

– ...jak fakt, iż okres obrotu Merkurego to dwie trzecie jego okresu obiegu. Tę liczbę wyjaśnia się w terminach sił pływowych wywieranych na Merkurego przez Słońce. A zatem niektóre rzeczy da się wyjaśnić. Ogólnie jednak to, co widzimy w Układzie Słonecznym, to efekt przypadku. Astronomowie pokroju Keplera, albo Klaudiusza Ptolemeusza przed nim, musieli w końcu porzucić wszelkie nadzieje na istnienie naturalnego wytłumaczenia. Tak już po prostu jest.

Przez chwilę milczy, po czym dodaje:

– Liczę, że nie będzie tak z masą elektronu.

– Czyli zostawiając na boku techniczną definicję, w naturalności chodzi o brak niewyjaśnionych parametrów? – pytam.

– Są rzeczy, które wręcz wołają o wyjaśnienie – mówi Weinberg. – Jak stosunek 2 do 1 albo coś, co jest 15 rzędów wielkości mniejsze od czegoś innego. Widząc coś takiego, czujesz, że trzeba to wytłumaczyć. Naturalność oznacza tyle, że dana teoria potrafi takie rzeczy wyjaśnić; że nie są one umieszczone w niej tylko po to, by zgadzała się z eksperymentem.

– Czy jest tu też ważne doświadczenie?

– O, tak – stwierdza Weinberg. – Dla niektórych rzeczy spodziewasz się istnienia naturalnego wyjaśnienia, a dla innych nie.

Następnie podaje przykład:

– Jeśli grając w karty, trzy razy z rzędu dostaniemy pokera królewskiego[38*], pomyślimy sobie: „No, to jest coś, co domaga się wyjaśnienia w terminach zamiarów krupiera". Z drugiej strony, jeśli dostaniemy kolejno trzy zestawy kart, które większość z nas nazwałaby przypadkowymi, przykładowo jakiś król pik, dwójka karo i tak dalej, każdy zestaw różny od poprzedniego, to nie ma w tym nic specjalnego; żadna z rąk nie jest wygrywająca; uznalibyśmy, że niczego nie trzeba tłumaczyć. W takiej sytuacji nie potrzebujemy naturalnego wyjaśnienia; te trzy układy są tak samo prawdopodobne jak inne. A przecież zasadniczo poker królewski jest równie prawdopodobny lub nieprawdopodobny jak pozostałe układy. Jest w nim jednak coś takiego, co woła o wyjaśnienie w sytuacji, gdy dostajemy go trzy razy z rzędu.

W grze Weinberga karty to prawa przyrody lub, mówiąc ściślej, wartości parametrów, które obecnie stosujemy. Ale jest to gra, w którą nigdy nie graliśmy i nie moglibyśmy grać. Wręczono nam zestaw kart, a my nie wiemy, po co i od kogo. Nie mamy pojęcia, jak dużą mieliśmy szansę na królewskiego pokera praw przyrody ani czy jest w nim cokolwiek specjalnego. Nie znamy reguł tej gry i nie znamy prawdopodobieństw.

– To zależy od rozkładu prawdopodobieństwa – mówię, próbując wytłumaczyć mój dylemat: że każde stwierdzenie na temat prawdopodobieństwa praw przyrody samo wymaga kolejnego prawa – prawa rządzącego probabilistyką praw. Tymczasem prostota podpowiadałaby wówczas teorię z ustaloną wartością parametru zamiast z całym rozkładem prawdopodobieństwa tego parametru na wieloświecie.

– Cóż – powtarza Weinberg – szansa otrzymania dwójki trefl, piątki karo, siódemki kier, ósemki kier i waleta kier, szansa na tę szczególną rękę pokerową, jest dokładnie taka sama jak szansa otrzymania asa, króla, damy, waleta i dziesiątki, wszystkich pik. Oba układy mają takie samo prawdopodobieństwo.

– O ile krupier jest uczciwy – zauważam, usiłując znaleźć pokerową metaforę dla rozkładu prawdopodobieństwa.

Ale ten antropomorficzny przykład sprawia, że czuję się nieswojo. Nie mogę otrząsnąć się z wrażenia, że w rzeczywistości próbujemy odgadnąć reguły, według których gra Bóg, aby upewnić się, że prawa przyrody zostały wybrane uczciwie, z nadzieją, że może Stwórca się pomylił, a my zasługujemy na wszechświat z gluinami o małej masie.

– Owszem – mówi Weinberg w odpowiedzi na moją uwagę, pozostając w pokerowej metaforze. – Ale ze względu na wartości przypisywane przez człowieka różnym rękom pokerowym, w myśl których jedna z nich wygra, a inna nie, bo takie są reguły pokera, zacznie pani zwracać uwagę, gdy jeden ze współgraczy dostaje pokera królewskiego, a nie gdy ma on w ręku jakiś zupełnie zwyczajny układ, który notabene jest równie nieprawdopodobny jak poker królewski. To człowiek nadaje temu układowi właściwość pod tytułem „wygrywająca ręka”. I dlatego przyciąga to naszą uwagę.

Fakt, to ludzka cecha, że koincydencje przyciągają naszą uwagę, jak na przykład unifikacja sprzężeń cechowania albo kromka wyskakująca z tostera z wizerunkiem Maryi Dziewicy. Ale nie widzę, jaki jest z tej ludzkiej cechy pożytek w procesie rozwijania lepszych teorii.

– Używam tego przykładu, by przyznać pani rację – mówi Weinberg ku mojemu zamroczeniu. – Gdyby nie miała pani pojęcia o zasadach pokera, mogłaby pani nie wiedzieć, że w pokerze królewskim jest coś szczególnego w porównaniu do

innych układów. Właśnie dlatego, że znamy zasady gry w pokera, pewne układy są dla nas szczególne. To kwestia doświadczenia.

Ale przecież nie mamy żadnego doświadczenia w kosmicznym pokerze! – myślę sobie zaniepokojona, bo wciąż nie widzę, co to wszystko ma wspólnego z nauką. Nie dysponujemy żadnym sposobem, by ocenić, czy obserwowane przez nas prawa przyrody są prawdopodobne – bez rozkładu prawdopodobieństwa nie ma prawdopodobieństwa. Aby móc stwierdzić, że takie nie są, potrzebowalibyśmy kolejnej teorii, a niby skąd mamy *ją* wziąć?[22] Jeśli Weinberg, którego wliczam w poczet największych żyjących fizyków, nie potrafi mi tego powiedzieć, to kto to zrobi? Pytam więc ponownie:

– Co zatem wiemy o rozkładzie prawdopodobieństwa tych parametrów?

– Ach, cóż, żeby go obliczyć, potrzebna jest teoria.

No właśnie.

∞∞

Obliczając prawdopodobieństwa w wielościecie, musimy uwzględniać to, że w naszym wszechświecie istnieje życie. Brzmi to jak coś oczywistego, ale nie każdy możliwy zestaw praw przyrody tworzy wystarczająco złożone struktury. A zatem poprawne prawa muszą spełniać pewne warunki – na przykład prowadzić do powstania stabilnych atomów lub czegoś podobnego do atomów. Ten ostatni wymóg nosi nazwę „zasady antropicznej".

Z zasady antropicznej zazwyczaj nie wynikają zbyt precyzyjne wnioski, ale w kontekście danej teorii pozwala ona szacunkowo określać, jakie wartości mogą przyjmować parametry tej teorii, aby wciąż pozostawała ona w zgodzie z obserwacją, że istnieje życie. Analogicznie, gdy widzisz kogoś idącego ulicą z kubkiem ze Starbucksa, wyciągasz wniosek, że warunki w tej części miasta

muszą dopuszczać istnienie takich kubków. Możesz oszacować, że najbliższy Starbucks znajduje się w promieniu trzech kilometrów, może ośmiu, a najpewniej nie dalej niż sto pięćdziesiąt kilometrów. Niezbyt to precyzyjne i może nieprzesadnie interesujące, niemniej dostarcza jakiejś informacji o otoczeniu.

Choć zasada antropiczna może razić jako coś głupawego i trywialnie prawdziwego, bywa przydatna do wykluczania niektórych wartości pewnych parametrów. Jeśli na przykład każdego ranka widziałabym pewnego człowieka jadącego do pracy samochodem, mogłabym wywnioskować, że jego wiek uprawnia go do posiadania prawa jazdy. Wprawdzie mogę się mylić, bo być może po prostu notorycznie łamie on prawo, ale wszechświat tak nie postępuje.

Muszę jednak zastrzec, że powoływanie się na „życie" w kontekście zasady antropicznej lub precyzyjnego dostrojenia jest powszechnie stosowanym, ale zbytecznym ornamentem słownym. Fizycy mają raczej niewiele wspólnego z nauką o samoświadomych istotach. Rozprawiają o powstawaniu galaktyk, zapłonie gwiazd lub stabilności atomów, które są warunkami wstępnymi do zaistnienia biochemii. Ale od fizyków nie należy oczekiwać, że będą dyskutować nawet o dużych molekułach. Mówienie o „życiu" jest z pewnością bardziej chwytliwe, ale nie stoi za tym nic więcej.

Pierwszym zakończonym sukcesem użyciem zasady antropicznej było przewidzenie przez Freda Hoyle'a w 1954 roku pewnych właściwości jądra atomu węgla, niezbędnych, aby możliwe było wytworzenie tego pierwiastka we wnętrzach gwiazd; właściwości, które potwierdzono w późniejszych odkryciach[23]. Hoyle miał wykorzystać fakt, iż węgiel ma centralne znaczenie dla życia na Ziemi, a zatem gwiazdy muszą być w stanie go produkować. Niektórzy historycy wątpią, czy rozumowanie Hoyle'a rzeczywiście tak przebiegało, ale sam fakt, że mogło tak być, pokazuje, iż

argumentacja antropiczna może prowadzić do użytecznych wniosków[24].

Zasada antropiczna narzuca więc pewne więzy na nasze teorie, wymuszając ich zgodność z obserwacją. Jest poprawna niezależnie od tego, czy wieloświat istnieje, czy nie, a także bez względu na rzeczywiste wyjaśnienie wartości parametrów w naszych teoriach – jeśli takie wyjaśnienie w ogóle jest możliwe.

Powodem, dla którego zasada antropiczna jest często przywoływana przez zwolenników wieloświata, jest to, iż ich zdaniem jest to *jedyne* wyjaśnienie i nie ma innych czynników wpływających na wybór obserwowanych przez nas wartości parametrów. To jednak wymaga wykazania, że z punktu widzenia powstawania życia są to rzeczywiście jedyne możliwe wartości (albo przynajmniej bardzo prawdopodobne). A to jest już wysoce kontrowersyjne.

Typowy argument tłumaczący wartości parametrów w wieloświecie zasadą antropiczną brzmi następująco: oto gdyby parametr *x* był tylko odrobinę większy lub mniejszy, nie moglibyśmy istnieć. Dysponujemy garścią przykładów, w których jest to prawda, takich jak siła oddziaływań silnych: gdyby były słabsze, duże atomy byłyby niestabilne, a gdyby były silniejsze, gwiazdy wypalałyby się zbyt szybko[25]. Problem z takimi argumentami polega na tym, że niewielkie modyfikacje jednego z dwudziestu kilku parametrów nie biorą pod uwagę ogromu możliwych kombinacji. Należałoby raczej rozważyć niezależne modyfikacje wszystkich parametrów, aby móc wyciągnąć wniosek, że istnieje tylko jedna kombinacja sprzyjająca życiu. Takich obliczeń nie sposób jednak obecnie przeprowadzić.

Choć w tym momencie nie jesteśmy w stanie przebadać całej przestrzeni parametrów w poszukiwaniu wszystkich kombinacji sprzyjających życiu, możemy przynajmniej spróbować zidentyfikować kilka z nich. Takiej próby już dokonano i dlatego

sądzimy, że istnieje więcej niż jedna kombinacja parametrów, która tworzy wszechświat gościnny dla życia.

Na przykład w swoim artykule z 2006 roku zatytułowanym *A universe without weak interactions* [Wszechświat bez oddziaływań słabych] Roni Harnik, Graham Kribs i Glad Perez przedstawili wszechświat, który wydaje się spełniać warunki wstępne dla życia, mimo iż zawiera całkowicie odmienne cząstki fundamentalne od naszych[26]. W 2013 roku Abraham Loeb z Uniwersytetu Harvarda przekonywał, że prymitywna forma życia mogła istnieć już we wczesnym wszechświecie[27]. Z kolei ostatnio Fred Adams i Evan Grohs wykazali, iż jeśli zmodyfikujemy w naszych teoriach kilka parametrów jednocześnie, to da się sprawić, by gwiazdy wytwarzały węgiel za pomocą innego mechanizmu niż ten przewidziany przez Hoyle'a – po prostu te inne opcje stoją w sprzeczności z obserwacjami, które Hoyle już znał[28].

Powyższe trzy przykłady pokazują, że chemia wystarczająco złożona, aby umożliwiać życie, może wyłonić się w sytuacjach w niczym nieprzypominających tych, których doświadczamy, a nasz wszechświat wcale nie jest taki wyjątkowy[29]. Niemniej zasada antropiczna może wciąż działać dla jakiegoś parametru, jeśli efekty z nim związane są w dużej mierze niezależne od wartości pozostałych parametrów. Innymi słowy, nawet jeśli nie da się skorzystać z zasady antropicznej w celu wyjaśnienia wartości wszystkich parametrów, ponieważ wiemy, że istnieją inne kombinacje spełniające warunki wstępne dla powstania życia, to być może niektóre z parametrów muszą przyjmować tę samą wartość we wszystkich takich „życiodajnych" przypadkach, ponieważ ich działanie jest uniwersalne. Do tego typu parametrów często zalicza się stałą kosmologiczną[30]. Gdyby była zbyt wielka, to (w zależności od jej znaku) wszechświat albo rozszerzałby się

zbyt szybko, rozrywając wszystkie zawarte w nim struktury, albo zapadłby się, zanim gwiazdy miałyby szansę powstać.

Wciąż jednak, jeśli chcemy otrzymać prawdopodobieństwo, a nie tylko ograniczenia wartości parametrów, potrzebujemy rozkładu prawdopodobieństwa dla możliwych teorii, a rozkład taki nie może pochodzić z samych teorii – wymaga dodatkowego piętra matematycznej struktury, metateorii mówiącej, jak prawdopodobne są poszczególne teorie. Taki sam problem pojawia się w związku z naturalnością: próba wyeliminowania ludzkiego wyboru po prostu przenosi ten wybór gdzie indziej. W obu przypadkach trzeba dodawać założenia – w tym przypadku rozkład prawdopodobieństwa – których można by uniknąć poprzez ustalenie parametru.

∞∞

Najsłynniejsze przewidywanie oparte na hipotezie wieloświata dotyczy stałej kosmologicznej i pochodzi nie od kogoś innego, ale od Stevena Weinberga[31]. Było to w roku 1997, kiedy teoretycy strun właśnie się zorientowali, że wieloświat jest w ich teorii nie do uniknięcia. Artykuł Weinberga wniósł znaczący wkład w zaakceptowanie wieloświata jako koncepcji naukowej.

– Parę lat temu wspólnie z dwoma kolegami z wydziału astronomii, Paulem Shapiro i Hugo Martelem, napisaliśmy artykuł – mówi Weinberg. – Skupiliśmy się na szczególnej stałej: stałej kosmologicznej, którą całkiem niedawno zmierzono za pośrednictwem jej wpływu na rozszerzanie się wszechświata[39*]. Założyliśmy, że rozkład prawdopodobieństwa jest zupełnie płaski, czyli że wszystkie wartości stałej są równie prawdopodobne. Następnie stwierdziliśmy: „To, co widzimy, jest obarczone błędem systematycznym, ponieważ musi mieć wartość pozwalającą na wyewoluowanie życia. Jaki więc będzie rozkład prawdopodobieństwa, który to uwzględnia?”. Obliczyliśmy

odpowiednią krzywą rozkładu i zadaliśmy sobie pytanie: „Gdzie jest osiągane maksimum? Jaka jest najbardziej prawdopodobna wartość?”. Okazało się, że wartość ta leży całkiem blisko wartości stałej kosmologicznej, jaką rok później zmierzono[32].

Weinberg tłumaczy dalej:

– A zatem można powiedzieć, że gdybyśmy dysponowali teorią fundamentalną, która przewidywałaby olbrzymią liczbę wielkich wybuchów różniących się zawartością ciemnej energii wraz z płaskim rozkładem prawdopodobieństwa dla stałej kosmologicznej, czyli takim, który nie wyróżnia żadnej konkretnej wartości, to wartość tej stałej obserwowana przez istoty żywe byłaby dokładnie taka, jak należałoby się spodziewać.

Albo też, myślę sobie, można powiedzieć, że wieloświat jest tylko matematycznym narzędziem. Tak jak przestrzenie wewnętrzne. Kwestię jego rzeczywistego istnienia można zostawić filozofom.

Przez jakiś czas obracam tę ideę w głowie, ale wciąż nie widzę powodu, dla którego odgadnięcie rozkładu prawdopodobieństwa dla parametru miałoby być lepsze od odgadnięcia samego parametru. Rzecz jasna oprócz tego, że to pierwsze nadaje się do publikacji, bo wiąże się z obliczeniami, podczas gdy to drugie jest w jaskrawy sposób nienaukowe.

– Pragnę zauważyć, że rozmawiamy już pół godziny i moje gardło się poddaje – mówi Steven Weinberg, pokasłując. – Mam wrażenie, że omówiłem już właściwie wszystko, co chciałem. Czy możemy w tym miejscu przerwać?

Dochodzę do wniosku, że grzecznie będzie w tym momencie podziękować i wyjść.

Wyzwalający dysonans

Nie mogę powiedzieć, żebym była fanką muzyki dodekafonicznej. Ale przyznaję też, że nie poświęciłam zbyt wiele czasu na jej słuchanie. Co innego krytyk muzyczny Anthony Tommasini. W krótkim filmiku dla „New York Timesa" z 2007 roku mówi o „wyzwalającym dysonansie" w kompozycjach Arnolda Schönberga, wynalazcy muzyki dwunastotonowej[33]. Nowatorski system Schönberga powstał w latach dwudziestych minionego stulecia i przez krótki czas cieszył się popularnością wśród zawodowych muzyków w latach siedemdziesiątych, nigdy jednak nie przyjął się w szerszych kręgach.

– Schönberg bardzo by się pogniewał, gdyby ktoś rozumiał dysonansowość jego muzyki w szorstkim, pejoratywnym, negatywnym sensie – opowiada Tommasini. – On sam uważał, że umożliwia w ten sposób wyrażenie pełni życia, bogactwa i złożoności. [...] Przykładowo, oto jego kompozycja na fortepian z opusu dziewiętnastego, pełna dysonansów, ale prześliczna i delikatna.

Gra kilka taktów, a potem prezentuje kolejny przykład.

– [Ten motyw] można zharmonizować w C-dur. – Tommasini demonstruje, jawnie niezadowolony. – Ale wtedy staje się *strasznie* nudny w porównaniu do oryginału [Schönberga].

Wraca do wersji dwunastotonowej.

– Ach – wzdycha, wygrywając kolejny dysonujący akord. Dla mnie brzmi to, jakby kot spacerował po klawiaturze.

Może gdybym słuchała dodekafonii wystarczająco często, przestałabym słyszeć kakofonię, a zaczęłabym uważać ją za „delikatną" i „wyzwalającą", tak jak Tommasini. Jak pokazali Voss i Clarke, odczuwanie piękna muzyki jest do pewnego stopnia uniwersalne, co odzwierciedlają znalezione przez nich wzorce wspólne dla różnych gatunków muzycznych. Inni badacze odkryli,

że częściowo formuje się ono także w toku naszego wychowania, gdy kształtują się reakcje na akordy konsonujące i dysonujące[34]. Ale cenimy także nowość. Ci, którzy utrzymują się ze sprzedaży nowych idei, wykorzystują każdą możliwość, by zerwać z tym, co znane i nudne.

Także w nauce nasze postrzeganie piękna i prostoty jest po części uniwersalne, a po części ukształtowane w procesie edukacji. Podobnie jak w muzyce, to, co odbieramy w nauce jako przewidywalne, a mimo to zaskakujące, zależy od naszego obycia z tematem; nasza tolerancja na nowość zwiększa się wraz z włożoną pracą.

Faktycznie, im więcej czytam o wielościecie, tym ciekawszy mi się wydaje. Potrafię dostrzec, w jak zadziwiająco prosty, a przy tym dalekosiężny sposób zmienia postrzeganie naszego własnego znaczenia w świecie (bądź jego braku). Być może Tegmark ma rację i jestem po prostu emocjonalnie uprzedzona do czysto logicznych konsekwencji. Wielościat to prawdziwie wyzwolona matematyka, wyrażająca pełnię życia, bogactwo i złożoność.

No i stojący za nią laureat Nagrody Nobla też ma swoją wagę.

W skrócie

- Fizycy teoretycy używają prostoty, naturalności i elegancji jako kryteriów oceny teorii.
- W związku z tym, że naturalność stoi obecnie w sprzeczności z obserwacjami, wielu fizyków uznaje, że jedyną alternatywą dla „naturalnych” praw jest hipoteza wielościata.
- Jednak zarówno naturalność, jak i wielościat wymagają metateorii, która określałaby prawdopodobieństwo obserwowanego przez nas świata, a to stoi w konflikcie z prostotą.
- Nie jest nawet jasne, jaki problem usiłują rozwiązać naturalność i hipoteza wielościata, albowiem żadna z nich nie jest konieczna do wyjaśnienia obserwacji.

• • • Hipoteza wieloświata nie przez wszystkich jest uważana za elegancką, co pokazuje, że postrzeganie piękna może być i jest zmienne; jej popularność nie daje się wytłumaczyć wyłącznie pięknem.

Rozdział 6

Niepojęta pojmowalność mechaniki kwantowej

W którym rozmyślam nad różnicą między matematyką i magią.

Wszystko jest niesamowite, a każdy narzeka

Mechanika kwantowa odniosła spektakularny sukces. Opisuje świat atomowy i subatomowy z najwyższą precyzją. Przetestowaliśmy ją wzdłuż i wszerz, z góry na dół, nie stwierdzając żadnych odstępstw. Mechanika kwantowa za każdym razem miała słuszność. Pomimo tego, a może właśnie dlatego, nikt jej nie lubi. Po prostu do niej przywykliśmy[1].

W artykule przeglądowym na łamach „Nature Physics" z 2015 roku Sandu Popescu nazywa aksjomaty mechaniki kwantowej „bardzo matematycznymi", „fizycznie niejasnymi" oraz „daleko mniej naturalnymi, intuicyjnymi i »fizycznymi« od aksjomatów pozostałych teorii"[2]. Wyraża tym powszechną opinię. Seth Lloyd, znany ze swoich prac w obszarze informatyki kwantowej, zgadza się, że „mechanika kwantowa przeczy intuicji"[3]. Z kolei Steven Weinberg w swoich wykładach z tej dziedziny ostrzega czytelnika, iż „idee mechaniki kwantowej stanowią głębokie odejście od zwykłej ludzkiej intuicji"[4].

Nie chodzi o to, że mechanika kwantowa jest technicznie trudna, bo nie jest. W swojej warstwie matematycznej korzysta z równań, dla których dysponujemy prostymi metodami rozwiązywania, w ostrym przeciwieństwie do równań ogólnej teorii względności, które są paskudnie trudne do rozwiązania. Nie

chodzi więc o trudność – chodzi o to, że mechanika kwantowa wydaje się nie do końca w porządku. Wzbudza niepokój.

Zaczyna się od funkcji falowej. Jest to matematyczny obiekt opisujący dany układ fizyczny. Często mówi się o niej jako o zadającej stan układu, jednakże – i tu zaczyna robić się ślisko – nie da się jej obserwować poprzez jakikolwiek pomiar. Funkcja falowa jest tylko czymś pośrednim; można za jej pomocą tylko obliczyć prawdopodobieństwa możliwych wyników pomiarów pewnych obserwabli[40*].

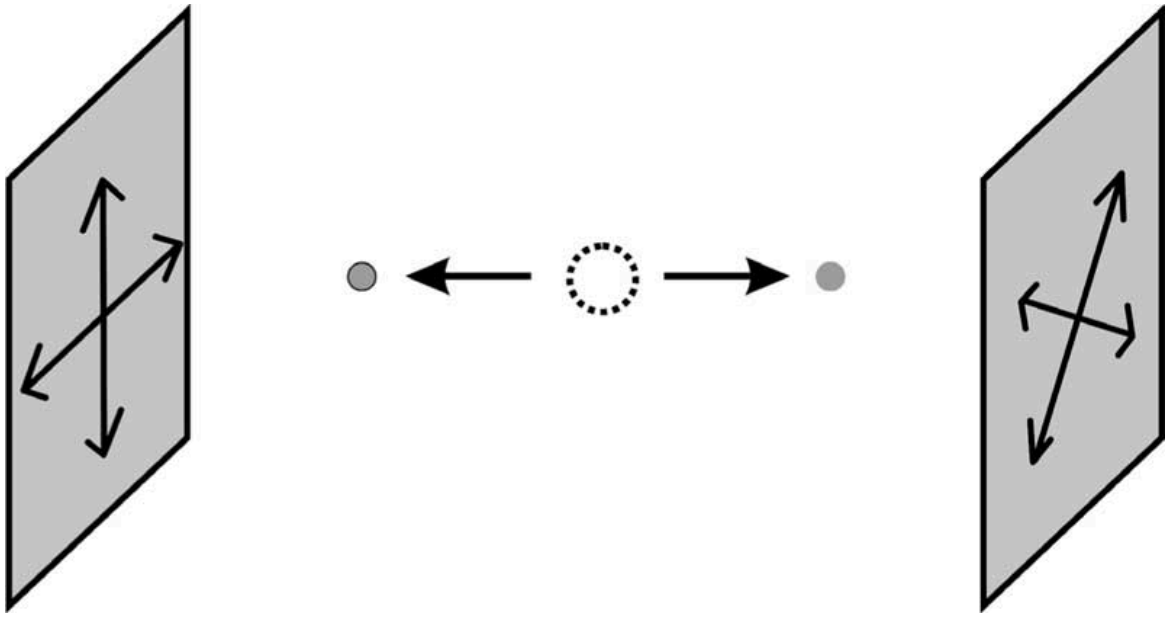
To jednak oznacza, że po pomiarze funkcja falowa musi ulegać swego rodzaju aktualizacji, tak aby zmierzony stan miał teraz prawdopodobieństwo równe 1. Aktualizacja ta – określana niekiedy mianem „kolapsu" lub „redukcji" – jest natychmiastowa; następuje w tej samej chwili dla całej funkcji falowej, bez względu na to, jak szeroko funkcja ta była rozprzestrzeniona. Jeśli na przykład obejmowała swoim zasięgiem dwie odległe wyspy, to dokonanie pomiaru na jednej z nich determinuje prawdopodobieństwo na drugiej.

To nie jest eksperyment myślowy; takie doświadczenie faktycznie przeprowadzono.

W lecie 2008 roku grupa Antona Zeilingera przybyła na Wyspy Kanaryjskie, aby pobić światowy rekord w kategorii długozasięgowych efektów kwantowych[5]. Na wyspie La Palma za pomocą lasera wyprodukowano 19 917 par fotonów; całkowita polaryzacja każdej pary wynosiła zero, ale polaryzacja każdego z fotonów była nieznana. Zespół Zeilingera wysłał po jednym fotonie z każdej pary do odbiornika znajdującego się na Teneryfie, odległej o 144 kilometry. Pozostałe fotony krążyły przez 6 kilometrów w zwiniętym światłowodzie na La Palmie. Następnie badacze zmierzyli polaryzację na obu wyspach.

Ilekroć znana jest całkowita polaryzacja, jej pomiar dla jednego fotonu mówi co nieco na temat polaryzacji drugiego fotonu. To,

jak wiele mówi, zależy od kąta między kierunkami, w których mierzy się polaryzację w dwóch odległych detektorach (rysunek 9). Jeśli oba detektory mierzą polaryzację w tym samym kierunku, to zmierzenie jej dla jednego z fotonów daje pełną informację o polaryzacji drugiego. Jeśli kierunki te są prostopadłe, to pomiar polaryzacji jednego z fotonów nie mówi nam nic o drugim. Dla kątów leżących pomiędzy 0 a 90 stopniami zdobywamy częściową informację, której miarą jest prawdopodobieństwo, że oba wyniki będą zgodne[41*].



Rysunek 9. Szkic eksperymentu omawianego w tekście. Stan początkowy o całkowitej polaryzacji równej zero (przerywane kółko) rozpada się na dwie cząstki, których polaryzacja musi sumować się do zera. Następnie ich polaryzacje są mierzone przez dwa detektory (szare płytki) w dwóch kierunkach ustawionych względem siebie pod pewnym kątem.

Możemy obliczyć to prawdopodobieństwo bez używania mechaniki kwantowej, zakładając, że cząstki od momentu powstania mają ustaloną polaryzację. Okazuje się jednak, że rezultat takich obliczeń nie zgadza się z pomiarem; jest zwyczajnie błędny. Dla niektórych kątów pomiary polaryzacji zgadzają się częściej, niż powinny. Wydaje się, że choć cząstki

znajdują się od siebie w odległości 144 kilometrów, są ze sobą powiązane silniej, niż może wyjaśnić ich wspólne pochodzenie. Dopiero gdy dokonamy obliczeń w ramach mechaniki kwantowej, otrzymamy poprawny wynik. Jesteśmy zmuszeni wyciągnąć wniosek, iż nie jest tak, że cząstki przed pomiarem miały taką czy inną polaryzację, lecz że miały obie.

Kanaryjski eksperyment Zeilingera nie był ani pierwszym, ani ostatnim doświadczeniem wykazującym, iż w celu poprawnego opisania obserwacji musimy zaakceptować, że nieobserwowane cząstki mogą znajdować się w dwóch różnych stanach naraz. Choć doświadczenie to ustanowiło (ówczesny) rekord odległości, całe mnóstwo innych eksperymentów uwidoczniło to samo: mechanika kwantowa, jakkolwiek dziwna, jest poprawna. Czy nam się to podoba, czy nie, jesteśmy na nią skazani.

Fakt, iż funkcja falowa z wyniku pomiaru po prostu kolapsuje, jest szczególnie irytujący, albowiem nie znamy w fizyce żadnego innego procesu, który byłby natychmiastowy. We wszystkich pozostałych teoriach istnienie związku między tym, co dzieje się w dwóch miejscach, oznacza, że coś musiało przebyć drogę z jednego punktu do drugiego z prędkością mniejszą od prędkości światła. Takie stopniowe rozprzestrzenianie się wraz z upływem czasu określa się mianem „lokalności” i zgadza się ono z naszym codziennym doświadczeniem. Tymczasem mechanika kwantowa kpi sobie z naszych oczekiwań, ponieważ cząstki splątane są powiązane nielokalnie. Gdy zmierzy się jedną z nich, druga dowiaduje się o tym natychmiast. Einstein nazywał to „upiornym oddziaływaniem na odległość”[6].

Z drugiej strony, nielokalność mechaniki kwantowej jest bardzo subtelna, albowiem między cząstkami splątanymi nie dochodzi do wymiany informacji. Ponieważ wyniki pomiarów polaryzacji są nieprzewidywalne, nie da się wykorzystać par fotonów do przesłania wiadomości z jednego miejsca do drugiego.

W mechanice kwantowej, tak jak w niekwantowej, informacja nie może podróżować szybciej od światła. Wszystko jest matematycznie spójne. Tyle że... dziwne.

Kolejnym nieprzyjemnym aspektem mechaniki kwantowej jest to, że poprzez odwoływanie się do pomiarów jej aksjomaty zakładają istnienie obiektów makroskopowych – detektorów, komputerów, mózgów i tym podobnych – a to stanowi cios dla redukcjonizmu. Fundamentalna teoria powinna wyjaśniać wyłanianie się (emergencję) świata makroskopowego, a nie zakładać jego istnienie na poziomie aksjomatów.

Powyższe problemy mechaniki kwantowej są dziedziczone przez kwantowe teorie pola. A zatem również model standardowy wiąże się z tego typu trudnościami w wyjaśnianiu świata makroskopowego.

Pragnąc zilustrować problem z wyłanianiem się makroskopowego, niekwantowego świata, w 1935 roku Erwin Schrödinger kazał nam wyobrazić sobie kota zamkniętego w pudełku. Pudełko posiada wbudowany mechanizm, który gdy zostanie uruchomiony przez rozpadający się atom, uwalnia toksyczną substancję uśmiercającą kota. Rozpad atomu to proces kwantowy, a zatem jeśli okres połowicznego zaniku użytego izotopu wynosi, powiedzmy, 10 minut, to istnieje pięćdziesięcioprocentowa szansa, że nasz atom rozpadnie się w ciągu pierwszych 10 minut. Jednak mechanika kwantowa mówi nam, że dopóki nie wykonamy pomiaru, nie jest ani tak, że atom się rozpadł, ani tak, że się nie rozpadł. Znajduje się w tak zwanej superpozycji obu tych stanów. Co w takim razie z kotem Schrödingera? Czy jest równocześnie żywy i martwy, a ginie lub przeżywa dopiero w momencie otwarcia pudełka? Wydaje się to absurdalne.

I *jest* absurdalne. Istnieje dobry powód, dla którego w codziennym życiu nigdy nie jesteśmy świadkami takiego

kwantowego zachowania. W przypadku dużych obiektów – jak koty, mózgi albo komputery – typowo kwantowe zjawiska bardzo szybko zanikają. Obiekty takie zazwyczaj są zanurzone w ciepłym, rozedrganym otoczeniu, z którym bezustannie oddziałują, a kwantowe powiązania między ich częściami składowymi ulegają zniszczeniu. W wyniku tego procesu – zwanego dekoherencją – stany kwantowe błyskawicznie zmieniają się w zwykłe (niekwantowe) rozkłady prawdopodobieństwa, nawet pod nieobecność urządzeń pomiarowych. Dekoherencja wyjaśnia więc, dlaczego nie obserwujemy superpozycji dużych obiektów. Kot nie jest jednocześnie żywy i martwy; po prostu istnieje pięćdziesięcioprocentowe prawdopodobieństwo, że zginął.

Dekoherencja nie tłumaczy jednak, w jaki sposób rozkład prawdopodobieństwa w następstwie pomiaru ulega aktualizacji do postaci, w której to, co zaobserwowaliśmy, ma prawdopodobieństwo 1. Innymi słowy, rozwiązuje część zagadki, ale nie całość.

Z góry przegrana sprawa

Wciąż jestem w biurze Stevena Weinberga w Austin. Właśnie powiedział mi, że zaczyna chrypnąć, i spytał, czy możemy przerwać wywiad. Ignorując jego pytanie, mówię:

– Chciałam spytać o pana opinię na temat podstaw mechaniki kwantowej. Napisał pan w swojej książce, że trudno cokolwiek zmienić w mechanice kwantowej bez całkowitego jej rujnowania.

– Zgadza się – odpowiada Weinberg. – Ale nie dysponujemy żadną prawdziwie zadowalającą teorią mechaniki kwantowej.

Obrzuca mnie zmęczonym spojrzeniem, po czym sięga po jedną z książek na biurku.

– Mogę przeczytać pani, co widnieje w drugim wydaniu mojego podręcznika do mechaniki kwantowej. W podrozdziale 3.7

w pierwszym wydaniu napisałem dość negatywny akapit, a kiedy go potem przemyślałem, przeprawiłem go na jeszcze bardziej negatywny. Brzmi on następująco:

> Mój osobisty wniosek jest taki, iż nie dysponujemy dzisiaj interpretacją mechaniki kwantowej, która byłaby pozbawiona poważnych wad. Pogląd ten nie jest powszechnie podzielany. Wielu fizyków jest zadowolonych ze swoich interpretacji. Sęk w tym, że mowa o różnych interpretacjach dla różnych fizyków. Moim zdaniem powinniśmy poważnie rozważyć możliwość znalezienia jakiejś innej, bardziej satysfakcjonującej teorii, której mechanika kwantowa byłaby tylko dobrym przybliżeniem.

– Wciąż tak uważam. Włożyłem mnóstwo wysiłku w próbę sformułowania takiej nowej, bardziej satysfakcjonującej teorii, ale bezskutecznie... Mechanikę kwantową bardzo trudno przebić. Ale choć nie jest ona niespójna, ma kilka cech, które uważamy za odpychające. Nie chodzi o to, że zawiera prawdopodobieństwa. Chodzi o to, jakiego typu są to prawdopodobieństwa. Gdybyśmy – tłumaczy Weinberg – mieli do czynienia z teorią mówiącą, że cząstki jakoś tam się poruszają i że z pewnym prawdopodobieństwem dana cząstka poleci tu lub tam, albo jeszcze gdzieś indziej, mógłbym z tym żyć. W mechanice kwantowej nie podoba mi się to, że stanowi ona formalizm służący do obliczania prawdopodobieństw rezultatów pewnych ingerencji w przyrodę dokonywanych przez istoty ludzkie, zwanych przez nas eksperymentami. A teoria nie powinna odnosić się do istot ludzkich w swoich postulatach. Chcielibyśmy zrozumieć obiekty makroskopowe takie jak urządzenia pomiarowe i ludzie w terminach głębszej teorii. Nie chcemy wprowadzać ich już na poziomie aksjomatów.

∞∞

Chcąc uczynić mechanikę kwantową bardziej pociągającą, fizycy wymyślili różnorakie sposoby interpretowania jej warstwy matematycznej. Interpretacje te dzielą się na dwie szerokie kategorie: taką, w ramach której traktuje się funkcję falową (zazwyczaj oznaczaną grecką literą ψ, czyli psi) jako coś rzeczywistego (podejście „psi-ontyczne”), oraz alternatywną, w myśl której funkcja falowa jest tylko abstrakcyjnym wehikułem wiedzy o świecie (podejście „psi-epistemiczne”).

Podejście psi-epistemiczne nie tyle dostarcza odpowiedzi, ile uznaje same pytania za bezsensowne. Najlepiej znaną reprezentantką tej grupy jest interpretacja kopenhaska. To najpowszechniej nauczana interpretacja mechaniki kwantowej (i to nią posługiwałam się dotychczas w tym rozdziale). Zgodnie z interpretacją kopenhaską mechanika kwantowa stanowi czarną skrzynkę: na wejściu zadajemy układ eksperymentalny, następnie wciskamy matematyczny guzik i na wyjściu dostajemy prawdopodobieństwo. Pytania o to, co robiła cząstka, zanim została zmierzona, nie wolno zadawać. Innymi słowy, obowiązuje zasada „zamknij się i licz”, jak to ujął David Mermin[7]. To dość pragmatyczne nastawienie, niemniej jednak kolaps jest w nim uważany za „brzydką bliznę” (Lev Vaidman), przez którą cała teoria „traci znacznie na elegancji” (Max Tegmark)[8].

Nowszą odsłoną podejścia psi-epistemicznego jest QBizm, gdzie „Q” oznacza „kwantowy” (*quantum*), natomiast „B” odnosi się do „wnioskowania bayesowskiego”, pewnej metody obliczania prawdopodobieństw[42*]. Według QBizmu funkcja falowa to obiekt matematyczny skupiający w sobie informacje na temat rzeczywistego świata, jakimi dysponuje dany obserwator; ulega ona aktualizacji, ilekroć ów obserwator dokonuje pomiaru. Interpretacja ta zwraca uwagę, że może istnieć wielu obserwatorów (ludzi lub maszyn) dysponujących różnymi informacjami. Skrzynka wciąż jest czarna, ale teraz każdy ma

swoją. David Mermin uważa to podejście za „zdecydowanie najciekawsze", ale już zdaniem Seana Carrolla mamy tu do czynienia ze „strategią »wyparcia«"[9].

Z kolei interpretacje psi-ontyczne mają tę przewagę, że są konceptualnie bliższe teoriom przedkwantowym, które przywykliśmy lubić, ale mają też tę wadę, że zmuszają nas do mierzenia się z innymi problemami mechaniki kwantowej.

Według teorii fali pilotującej (zwanej też teorią de Broglie'a–Bohma) ruch klasycznie rozumianych cząstek wynika z ich oddziaływania z pewnym nielokalnym polem przewodnim (*guiding field*). Chociaż zupełnie nie brzmi to jak mechanika kwantowa, jest to w rzeczywistości ta sama teoria, tyle że inaczej zapisana i zinterpretowana[10]. Teoria fali pilotującej jest obecnie niepopularna, gdyż nie udało się jej sformułować równie ogólnie jak interpretacji kopenhaskiej i nie da się jej stosować równie elastycznie. Jednak ze względu na jej intuicyjność Bell uważał ją za „naturalną i prostą"[11]. Z drugiej strony, John Polkinghorne zarzuca jej, że ma „nieprzyjemnie oportunistyczny posmak"[12].

Interpretacja wielu światów (lub wielu historii) twierdzi, że funkcja falowa w istocie nigdy nie ulega kolapsowi. Zamiast tego rozdziela się lub „rozgałęzia" na wszechświaty równoległe, po jednym dla każdego możliwego wyniku pomiaru. Według tej interpretacji problem pomiaru nie istnieje, a zamiast tego pytanie brzmi: dlaczego żyjemy w tym konkretnym wszechświecie? Steven Weinberg uważa te wszystkie wszechświaty za „odpychające", natomiast dla Maxa Tegmarka takie rozumowanie jest „urzekające" i według niego „najprostsza i zdaniem wielu najelegantsza teoria fizyczna posługuje się równoległymi wszechświatami ze swej istoty"[13].

Istnieją również modele ze spontanicznym kolapsem, w myśl których nie jest tak, że funkcja falowa wpierw się rozprzestrzenia, by potem nagle skolapsować, lecz zamiast tego ulega

bezustannej, nieznacznej kontrakcji, nigdy zaś zanadto się nie rozszerza. Jest to nie tyle nowa interpretacja, ile poprawka do mechaniki kwantowej, która poszerza ją o konkretny mechanizm kolapsu. Adrian Kent, którego zdaniem w mechanice kwantowej „elegancja wydaje się zaskakująco silnie wiązać z sensem fizycznym", uważa ideę kolapsu za „nieco *ad hoc*, a przy tym utylitarystyczną", jednak wciąż „nie tak nieelegancką jak teorie typu de Broglie'a–Bohma"[14].

Powyżej wymieniliśmy tylko główne interpretacje mechaniki kwantowej. Jest ich więcej, a w dodatku każda z nich może znajdować się w kilku różnych stanach naraz.

∞∞

Steven Weinberg odkłada swój podręcznik do mechaniki kwantowej. Patrzy na mnie, a ja bezskutecznie próbuję odczytać z jego twarzy, czy jest bardziej rozbawiony, czy może poirytowany faktem, że wciąż tu jestem. Dostrzegam, że owa podniesiona brew, na którą zwróciłam uwagę już wcześniej, najwidoczniej utknęła w tej pozycji na dobre.

Lectures on Quantum Mechanics [Wykłady z mechaniki kwantowej] to ostatni z jego podręczników, wydany dopiero w 2012 roku. Od tego czasu opublikował kilka artykułów na temat badania i lepszego zrozumienia podstaw mechaniki kwantowej. Widać, że jest to tematyka, która go ostatnio zajmuje. Ciekawi mnie, dlaczego zaczął się nią interesować. Co sprawia, że uznał to zagadnienie za warte roztrząsania, zważywszy na wszystkie inne zagadnienia, które mógłby roztrząsać?

– Co się panu nie podoba w dekoherencji, której efektem jest klasyczny rozkład prawdopodobieństwa? – pytam.

– Mechanikę kwantową można opisywać w terminach oddziaływania badanego układu z zewnętrznym środowiskiem,

w skład którego wchodzi obserwator – odpowiada[15]. – To jednak wymaga, by oddziaływanie układu kwantowomechanicznego z układem makroskopowym skutkowało dekoherencją do poszczególnych składowych początkowej funkcji falowej. Jak to zapewnić? Opis tego mechanizmu powinien być kwantowomechaniczny. Tymczasem, ściśle rzecz biorąc, w samej mechanice kwantowej nie ma dekoherencji.

Kaszle ponownie, po czym kontynuuje:

– Istnieje próba poradzenia sobie z tym, w której odrzuca się dekoherencję i rozważa traktowanie istot ludzkich całkowicie kwantowomechanicznie, tak jak wszystkich innych obiektów. Mowa o tak zwanym podejściu wielu historii. Według niego, jeśli zaczynamy od czystej funkcji falowej, to zawsze będzie ona czysta[16]. Tyle że z upływem czasu staje się zbudowana z coraz większej liczby składników, z których każdy zawiera opis obserwatorów. Obserwatorzy z poszczególnych składników są przekonani, że widzą co innego, na przykład zdaniem jednego spin [jakiejś cząstki] jest skierowany w górę, a zdaniem drugiego w dół. Być może da się jeszcze zdzierżyć wszechświat, którego historia rozgałęzia się na dwoje, ale w podejściu wielu historii mamy do czynienia z niekończącą się, ciągłą produkcją niewyobrażalnie wielu historii wszechświata. Cóż – kończy – być może tak się właśnie sprawy mają, nie dostrzegam tu nic logicznie niespójnego. Ale jednak jest coś odpychającego w wyobrażaniu sobie takiej olbrzymiej liczby historii.

– Co jest w niej odpychającego?

– Nie wiem. Ale coś jest. Może ta niekontrolowana liczba. Bo to nie jest coś, co dzieje się tylko wtedy, gdy jakiś fizyk zdobędzie rządowy grant i przeprowadzi eksperyment; to ma się dziać cały czas. Za każdym razem, gdy zderzą się dwie cząsteczki powietrza albo foton z jakiejś gwiazdy wpadnie w atmosferę... ilekroć cokolwiek się wydarzy, historia wszechświata ulega

zwielokrotnieniu. Chciałbym móc udowodnić, że takie ciągłe rozszczepianie się historii jest niemożliwe. Nie potrafię. Ale moim zdaniem to odpychające. Rzecz jasna ci, którzy wyszli z tą ideą, wcale tak nie uważają. Tak to już jest. Różni ludzie wyznają różne interpretacje mechaniki kwantowej, wszystkie zadowalające, choć odmienne.

– I zapewne każdy jest przekonany, że wszystkie inne teorie są odpychające – zauważam.

– To prawda. Spotkałem się z tym – mówi Weinberg, wzdychając. – Nawet wielcy filozofowie różnili się w tej kwestii – ciągnie. – Niels Bohr pierwotnie uważał, że pomiar wymaga wykroczenia poza mechanikę kwantową; że nie da się go opisać za pomocą czysto kwantowomechanicznych pojęć. Inni stwierdzili, że owszem, da się, tyle że trzeba się pożegnać z nadzieją na szczegółowy opis tego, co się dzieje; należy uznać, iż dysponujemy po prostu przepisem na obliczanie prawdopodobieństw możliwych wyników pomiaru... A potem jeszcze inni zaczęli mówić, że z mechaniką kwantową wszystko jest w najlepszym porządku, tyle że istnieje nieskończenie wiele historii. Mówię tu o podejściu [wielu światów]... Oczywiście, trudność bierze się też stąd, że zasadniczo nie musimy rozstrzygać tego problemu – kontynuuje Weinberg. – Przez całą swoją karierę nie wiedziałem, czym w istocie jest mechanika kwantowa. W jednej z książek przytaczam anegdotę, jak to mój kolega Philip Candelas opowiadał o doktorancie, którego kariera naukowa właściwie się rozpadła. Gdy spytałem go, co poszło nie tak, odparł, że nieszczęśnik „próbował zrozumieć mechanikę kwantową". Mógł zrobić całkiem dobrą karierę. Ale wchodzenie w podstawy mechaniki kwantowej to z góry przegrana sprawa.

(Jeśli czytelnik zacytuje tę anegdotę, zostanie być może pierwszą osobą, która zacytowała kogoś, kto zacytował kogoś, kto zacytował samego siebie cytującego kogoś innego).

– Czy zna pan książkę *Beauty and Revolution in Science* [Piękno i rewolucja w nauce] autorstwa filozofa nauki nazwiskiem McAllister? – pytam.

– Nie znam.

– Autor usiłuje rozszerzyć Kuhnowską koncepcję rewolucji naukowych. Wysuwa argument, że każda rewolucja w nauce wymaga zakwestionowania kanonów piękna wyznawanych przez uczonych.

– Kuhn jest znacznie bardziej radykalny – mówi Weinberg. – To oczywiste, że rewolucja wzywa do zakwestionowania i obalenia *czegoś*. Kuhn przekonywał, iż kwestionuje się i obala wszystko, do tego stopnia, że dane pokolenie nie jest już w stanie zrozumieć fizyki uprawianej pokolenie wcześniej. Moim zdaniem to nieprawda. Ale oczywiście podczas rewolucji naukowej coś faktycznie ulega zakwestionowaniu.

Milknie, a po chwili dodaje:

– Moim zdaniem to niezła myśl, że chodzi o sądy estetyczne. Przykładowo, rewolucja kopernikańska nastąpiła dlatego, że zdaniem Kopernika system heliocentryczny był atrakcyjniejszy od ptolemejskiego. Nie była spowodowana nowymi danymi. Rzecz jasna był to sąd estetyczny, który różnił się od dotychczasowych. Wydaje mi się też, że rewolucja newtonowska mogła nastąpić dlatego, że Newton nie uważał sił działających na odległość za nieeleganckie, jak czynił to Kartezjusz. Ten ostatni spróbował w związku z tym stworzyć bardzo nieelegancki model Układu Słonecznego, w którym wszystko opierało się na bezpośrednich przepychankach. Tymczasem Newton nie miał nic przeciwko sile działającej na odległość i malejącej z jej kwadratem. To była zmiana estetyki. Albo, można powiedzieć, zmiana filozoficznych przedzałożeń. Co nie musi się istotnie różnić. – Na chwilę milknie, po czym dodaje cicho, niemal do siebie: – Tak, to interesujący pomysł. Muszę zajrzeć do tej książki.

– Ale jeśli faktycznie jest tak – mówię, wracając do spostrzeżenia McAllistera – że podczas rewolucji trzeba zakwestionować obowiązujące kanony estetyczne, to jaki jest sens korzystania z przeszłych koncepcji piękna w procesie rozwijania teorii?

– Cóż, piękno jest tylko środkiem do osiągnięcia celu, jakim są skuteczne teorie – mówi Weinberg. – Nawet jeśli zmienia się rozumienie piękna, teorie mogą wciąż być poprawne. – Podaje przykład: – Podejrzewam, że w odczuciu Maxwella prawdziwie zadowalająca teoria elektromagnetyzmu powinna dotyczyć naprężeń w pewnym ośrodku drgającym i dopiero to wyjaśniałoby oscylacje pól elektrycznego i magnetycznego związane z rozchodzeniem się promienia światła. Dzięki pracom Maxwella i innych, w tym Heaviside'a, nauczyliśmy się myśleć o tych polach jako przenikających pustą przestrzeń, a ich oscylacje nie stanowią drgań jakiegoś eterycznego ośrodka, lecz są zaburzeniami samych tych pól. Równania sformułowane przez Maxwella wciąż działają. Jego teoria przetrwała, mimo iż jej pierwotna interpretacja uległa zmianie. Bardzo często – kontynuuje – to nie teorie fizyczne się zmieniają, lecz nasze rozumienie tego, co mówią i na czym opiera się ich prawdziwość. Nie sądzę więc, by zakwestionowaniu ulegało wszystko, aczkolwiek można zakwestionować dotychczasowe sądy estetyczne. Przeżywają natomiast teorie, które powstały dzięki tamtym sądom. O ile są skuteczne, a nie muszą.

Po czym wstaje i wychodzi.

Mechanika kwantowa to magia

Mechanika kwantowa jest dziwna, i to nie tylko jako teoria, ale także jako obszar badań. W fizyce cząstek mamy teorię, eksperyment, a pomiędzy nimi – fenomenologię. Fenomenolodzy (tacy jak Gordy Kane) trudnią się wyciskaniem przewidywań z teorii, głównie poprzez upraszczanie matematyki i określanie, co

da się zmierzyć, z jaką dokładnością i w jaki sposób (a nierzadko też przez kogo).

W innych dziedzinach fizyki badacze nie dzielą się tak ostro na te trzy kategorie. W każdej z nich jednak istnieją fenomenolodzy. Nawet w obszarze grawitacji kwantowej, gdzie nie ma eksperymentów, istnieją fenomenolodzy. Ale nie w mechanice kwantowej. W niej po jednej stronie mamy eksperymenty, i to mnóstwo, po drugiej zaś mamy spore zamieszanie w temacie interpretacji. Ale pomiędzy nimi jest raczej pusto.

Przyjrzawszy się tym wszystkim różnym interpretacjom i spróbowawszy oszacować ich stopień brzydoty, postanawiam pomówić z kimś reprezentującym stronę eksperymentalną, z kimś, kto na co dzień obcuje z kwantami. Mój wybór pada na Chada Orzela.

Chad jest profesorem fizyki w Union College w Schenectady w stanie Nowy Jork. Szerzej znany jest jako osoba, która nauczyła fizyki kwantowej swojego psa i napisała o tym książkę[17]. Chad pisze też blog popularnonaukowy Uncertain Principles[43*], poświęcony objaśnianiu zawiłości mechaniki kwantowej. Chcę spytać go, co sądzi na temat jej różnych interpretacji, więc umawiam się z nim na wideorozmowę.

– Chad – zaczynam – przypomnij mi, proszę, czym się zajmujesz.

– Specjalizuję się w chłodzeniu laserowym i w fizyce zimnych atomów – mówi mi Chad.

Po doktoracie zajmował się kondensatami Bosego–Einsteina, czyli chmurami atomów schłodzonymi do tak niskich temperatur, że istotne zaczynają być w nich efekty kwantowe.

– Na studiach doktoranckich przyglądałem się zderzeniom ultrazimnych atomów ksenonu – opowiada. – Ich względne prędkości mieszczą się w zakresie centymetrów lub milimetrów na sekundę, więc poruszają się na tyle wolno, że w zderzeniach

zaczynają uwidaczniać się efekty kwantowe. Ksenon ma wiele izotopów – wyjaśnia[44*]. – Jedne są złożonymi bozonami, a inne fermionami. Jeśli są tymi drugimi i się je spolaryzuje, powinny nie móc wchodzić w kolizję, bo wówczas pojawiałyby się dwa symetryczne stany[45*], a to jest zabronione.

Ten zakaz jest związany ze skrajnym indywidualizmem fermionów, który omówiliśmy w rozdziale 1. Po prostu nie da się zmusić dwóch fermionów do robienia tego samego w tym samym miejscu.

– Przygotowywaliśmy chmurkę atomów ksenonu – kontynuuje Chad – których zderzenia wiążą się z wymianą znacznej ilości energii i emisją jonu. Potem po prostu zliczaliśmy jony, w przypadku gdy atomy były spolaryzowane oraz w przypadku gdy nie były, i w ten sposób dowiadywaliśmy się, ile z nich weszło w kolizję. To bardzo czysty sygnał. Dało się zobaczyć różnicę w statystykach: bozony zderzają się aż miło, a fermiony nie. To czysto kwantowy efekt.

– Skoro atomy się nie zderzają, to co się z nimi dzieje? – pytam.

– Po prostu się nawzajem mijają – odpowiada Chad, wzruszając ramionami. – W trakcie mojej obrony doktoratu ktoś zapytał: „Co się stanie, gdy wyceluje się dwa takie atomy w siebie? Jak mogą się nie zderzyć?”. Odpowiedziałem wtedy żartobliwie: „Mechanika kwantowa to magia”. Bardziej poważna odpowiedź jest taka, że o atomach nie należy myśleć jak o kuleczkach bilardowych, które można dokładnie w siebie wycelować; lepiej wyobrażać je sobie jako duże, rozmyte obłoczki, które się nawzajem przenikają. Odwróciłem się do mojego promotora, świeżo upieczonego noblisty, i spytałem: „Czy zgadza się pan? Czy tak to działa?”, a on odrzekł: „Owszem, mechanika kwantowa to magia”[18].

Intuicyjnie nie powinno zaskakiwać, że nasza intuicja zawodzi w świecie kwantów. W codziennym życiu nie doświadczamy efektów kwantowych – są zbyt wątłe i kruche. Byłoby zresztą

dziwne, gdyby fizyka kwantowa była intuicyjna, bo przecież nie mieliśmy jak ani kiedy do niej przywyknąć.

Nieintuicyjność teorii nie powinna więc działać na jej niekorzyść. Niemniej, podobnie jak brak estetycznego powabu, stanowi ona przeszkodę w osiąganiu postępu. Może wręcz, myślę sobie, tym razem jest to przeszkoda, której nie będziemy w stanie pokonać. Może zastój w podstawach fizyki jest oznaką tego, że dotarliśmy do granicy ludzkich zdolności poznawczych. Może nadszedł czas, by przekazać pałeczkę dalej.

∞∞

Adam zajmuje się eksperymentami w dziedzinie wzrostu drobnoustrojów. Do jego zadań należy formułowanie hipotez i opracowywanie strategii badawczych. Spędza czas w laboratorium, obsługując inkubatory i wirówki. Ale Adam nie jest „kimś", lecz „czymś". To robot zaprojektowany przez zespół Rossa Kinga na Uniwersytecie Aberystwyth w Walii. Adam pomyślnie zidentyfikował geny drożdży odpowiedzialne za kodowanie pewnych enzymów[19].

Także w fizykę wkraczają maszyny. Uczeni pracujący w Creative Machines Lab na Uniwersytecie Cornella w Ithace w stanie Nowy Jork napisali program, który nakarmiony surowymi danymi, formułuje równania rządzące ruchem układów takich jak chaotyczne wahadło podwójne. Komputer potrzebował trzydziestu godzin, aby na nowo wyprowadzić prawa przyrody, nad których znalezieniem ludzkość biedziła się przez stulecia[20].

Z kolei w swojej niedawnej pracy w obszarze mechaniki kwantowej grupa Antona Zeilingera posłużyła się programem – znanym jako „Melvin" – w celu zaprojektowania eksperymentów przeprowadzonych następnie przez ludzi[21]. Mario Krenn, doktorant, który wpadł na pomysł automatyzacji etapu projektowania doświadczeń, jest zadowolony z rezultatów, ale

przyznaje, że wciąż „dość trudno [mu] zrozumieć, co się właściwie dzieje”[22].

A to dopiero początek. Rozpoznawanie wzorców i systematyzowanie informacji należą do kluczowych zadań stojących przed naukowcami, a równocześnie są to zadania, w których celować mają sztuczne sieci neuronowe. Tego typu komputery, wzorujące się na działaniu mózgów biologicznych, analizują dziś zbiory danych, których nie byłby w stanie opracować żaden człowiek, poszukując korelacji za pomocą algorytmów uczenia głębokiego (*deep learning*). Nie ma wątpliwości, że postęp techniczny zmienia to, co rozumiemy przez „uprawianie nauki”.

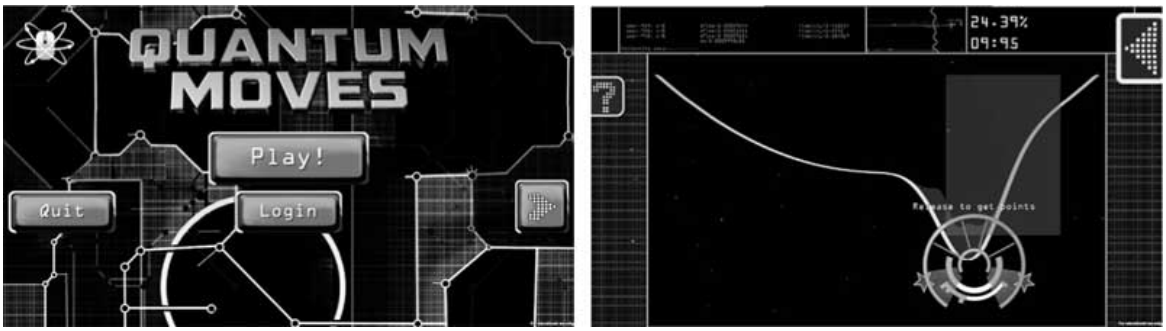
Próbuję sobie wyobrazić dzień, w którym po prostu wgramy wszystkie dane kosmologiczne jakiejś sztucznej inteligencji (*artificial intelligence*, w skrócie AI). Współcześnie zachodzimy w głowę, czym są ciemna materia i ciemna energia, ale być może te kwestie nawet nie będą mieć sensu dla przyszłej AI. Po prostu sformułuje ona jakieś przewidywania. My je przetestujemy. Jeśli okaże się, że AI ma za każdym razem rację, utwierdzimy się w przekonaniu, że odkryła właściwe wzorce i poprawnie je ekstrapolowała. To właśnie będzie nasz nowy standardowy model kosmologiczny. Wprowadzamy pytanie, otrzymujemy odpowiedź – i tyle.

Dla niefizyka może to się zbytnio nie różnić od czytania o przewidywaniach formułowanych przez społeczność fizyków przy użyciu niezrozumiałej matematyki i hermetycznej terminologii. Ot, kolejna czarna skrzynka. AI może nawet zasługiwać na większe zaufanie niż my.

Ale formułowanie przewidywań i ich późniejsze techniczne zastosowania stanowiły zawsze tylko jedną ze stron nauki. Drugą jest rozumienie. Pragniemy nie tylko odpowiedzi, lecz także wyjaśnień stojących za odpowiedziami. Kiedyś zapewne

osiągniemy granice naszych zdolności umysłowych, a wówczas nie pozostanie nam nic innego, jak tylko przekazać nasze pytania bardziej wyrafinowanym urządzeniom myślącym. Sądzę jednak, że jest jeszcze za wcześnie, by rezygnować z prób zrozumienia naszych teorii.

– Kiedy do mojej grupy dołączają młodzi ludzie – mówi Anton Zeilinger – z początku poruszają się po omacku, nie radzą sobie, nie mają intuicji. Ale po jakimś czasie, dwóch albo trzech miesiącach, dorównują do reszty i nabywają takiego intuicyjnego rozumienia mechaniki kwantowej, co w sumie całkiem ciekawie się obserwuje. To jak nauka jazdy na rowerze[23].



Rysunek 10. Zrzuty ekranu z gry *Quantum Moves*.

Intuicję wyrabia się poprzez obcowanie z tematem. Z mechaniką kwantową można poobcować – bez żadnych równań – za pomocą gry komputerowej *Quantum Moves* [Kwantowe ruchy][24]. W tej grze, zaprojektowanej przez fizyków z duńskiego Uniwersytetu w Aarhus, gracze zdobywają punkty, znajdując optymalne rozwiązania zagadnień kwantowych, takich jak przenoszenie atomów z jednej studni potencjału do drugiej. Symulowane atomy zachowują się zgodnie z prawami fizyki kwantowej. Nie wyglądają jak kuleczki, lecz jak dziwaczny płyn, który spełnia zasadę nieoznaczoności i może tunelować z jednego miejsca w inne. Trzeba trochę cierpliwości, by się z nim oswoić. Jednak ku zaskoczeniu badaczy najlepsze rozwiązanie spośród

strategii opracowanych przez internetowych graczy było efektywniejsze od tych znalezionych przez komputerowy algorytm[25]. Jak się wydaje, gdy idzie o kwantową intuicję, ludzie biją na głowę AI. Przynajmniej na razie[46*].

Może więc, myślę sobie, powinniśmy przestać powtarzać, że mechanika kwantowa jest dziwna, i przywyknąć do niej. Zgoda, może i stanowi zaawansowaną technologię, ale wciąż jest odróżnialna od magii[47*].

∞∞

Przez *bon mot* Chada o kwantowej magii i towarzyszące mu wzruszenie ramion zaczynam się zastanawiać, czy mój rozmówca w ogóle troszczy się o interpretowanie matematycznej warstwy mechaniki kwantowej. Ale trudno jej nie interpretować. Używając na co dzień jakiegoś matematycznego formalizmu, człowiek wyrabia sobie pewien obraz tego, co dzieje się w trakcie obliczeń. Nie patrzy wyłącznie na wynik; widzi też, jak do niego doszedł. Ludzie generalnie radzą sobie lepiej z abstrakcją, gdy towarzyszy jej jakaś opowieść.

– Czy masz ulubioną interpretację mechaniki kwantowej? – pytam Chada.

– Jestem z natury osobą spod znaku „zamknij się i licz” – odpowiada. – Wydaje mi się, że jeśli nie da się wykonać eksperymentu, który dałby różne wyniki dla różnych scenariuszy, to jest to dość bezsensowne. Ciekawie jest dyskutować, co dzieje się z tymi wszystkimi dziwacznymi efektami na drodze do zwyczajnej, makroskopowej rzeczywistości. Ale w moim rozumieniu przy obecnym stanie wiedzy nikt nie jest w stanie zaproponować możliwego do przeprowadzenia eksperymentu, który mógłby rozsądzić, dajmy na to, między wieloma światami a [falą pilotującą]. Wobec braku takiej możliwości wybór jest kwestią estetyki. Jednocześnie uważam za cenne, że ludzie badają

te wszystkie interpretacje, bo ma to wpływ na pytania, które uznajemy za warte zadania. I choć każdy z eksperymentów można wyjaśniać w ramach dowolnej interpretacji, to niektóre typy eksperymentów nasuwają się bardziej naturalnie przy takiej interpretacji, a inne przy siakiej.

Jako przykład wymienia eksperymenty, w których wyznacza się średnią trajektorię ruchu cząstek przechodzących przez podwójną szczelinę[48*] – trajektorie te mają sens w ramach interpretacji fali pilotującej, ale stają się bezsensowne, jeśli uznać, że funkcja falowa jedynie reprezentuje informację posiadaną przez obserwatora. Z kolei eksperymenty z kopiowaniem i wymazywaniem stanów kwantowych interpretuje się łatwiej w terminach przesyłu informacji.

– Czemu jest tyle sporów o „słuszną" interpretację, skoro nie ma mowy o jej doświadczalnym sprawdzeniu? – pytam.

– O ile rozumiem – mówi Chad – główna linia podziału przebiega między obozami epistemologicznym i ontologicznym. Według obozu ontologicznego funkcja falowa to coś, co rzeczywiście istnieje i zmienia się w czasie, natomiast obóz epistemologiczny uważa, że funkcja ta w istocie jedynie opisuje naszą wiedzę, stanowi ilościową miarę naszej ignorancji o świecie. Pomiędzy tymi dwiema interpretacjami rozciąga się całe spektrum, na którym można poumieszczać wszystkie pozostałe. Po jednej stronie znajdują się ci, dla których kamieniem obrazy jest nieciągły kolaps. Jest on czymś skrajnie nieestetycznym dla zwolenników podejścia epistemicznego. Pojawia się jednak klasyczny argument Einsteina o Księżycu, na który nikt nie patrzy.

Einstein uważał, że mechanika kwantowa jest niekompletna. Jego zdaniem obiekty fizyczne powinny mieć ściśle określone własności niezależnie od tego, czy ktoś je obserwuje, czy nie. Swój pogląd zwykł ilustrować argumentem, iż absurdem jest myśleć, że Księżyc nie istnieje, kiedy nikt nań nie patrzy[26].

Pamiętajmy jednak, iż ze względu na dekoherencję nie należy oczekiwać, że duże obiekty będą przejawiać własności kwantowe. Podobnie jak kot Schrödingera, Księżyc Einsteina stanowi raczej wyolbrzymienie problemu w celach poglądowych, a nie sam problem.

Chad tłumaczy, na czym polega siła księżycowego argumentu Einsteina:

– Rzeczy powinny istnieć niezależnie od tego, czy ludzie posiadają na ich temat jakiekolwiek informacje. Ludzie chcą wierzyć w obiektywne istnienie rzeczywistości, a według reprezentantów strony ontologicznej utrzymywanie, iż dana rzecz nie istnieje, dopóki nie zmierzysz jakiejś jej własności, urąga estetyce. Podsumowując, ludzie z obu krańców spektrum dostrzegają u siebie nawzajem coś gorszącego.

– A gdzie ty jesteś na tym spektrum?

– Widzę trochę słuszności w obu punktach widzenia – mówi Chad. – W większości się zgadzam, że tym, co poznajemy, jest informacja o świecie, ale wygodnie mi też wierzyć, że istnieje stan, do którego [ta informacja] *się odnosi*. Lokuję się więc w niezdecydowanym środku.

– W fizyce cząstek – mówię – ludzie czepiają się rzeczy, które im się nie podobają, bo ich zdaniem mogą one wskazywać drogę do lepszej teorii. Czy podobnie jest w podstawach mechaniki kwantowej?

– Mam wrażenie, że wygląda to jednak nieco inaczej niż w fizyce cząstek – odpowiada Chad. – W waszej dziedzinie są pewne bardzo konkretne problemy ilościowe, które umiecie nam wskazać, a na które my po prostu nie umiemy znaleźć odpowiedzi. Na przykład ciemna energia. Możemy obliczyć energię próżni i wyjdzie o sto dwadzieścia rzędów wielkości za dużo, a wtedy wy musicie stawać na głowie, żeby się tego pozbyć. Tymczasem w podstawach mechaniki kwantowej panuje

zgoda [co do tego, jaki będzie efekt przepuszczenia elektronu przez podwójną szczelinę]. Pytanie brzmi: co się według ciebie działo z nim *w międzyczasie*? Każdy może zaprząc istniejący formalizm [matematyczny], przeprowadzić obliczenia i otrzymać właściwy wynik z dokładnością do jakiejś obłędnej liczby cyfr po przecinku. Problem nie jest więc ilościowy. Jest znacznie bardziej filozoficzny niż problemy w fizyce cząstek. Obie dziedziny zawierają w sobie składową estetyczną. W obu panuje odczucie, że świat nie powinien wyglądać tak brzydko pod względem matematycznym. Ale w podstawach mechaniki kwantowej nie ma niezgodności ilościowych. Uczonym nie podobają się pewne dziwaczne rzeczy, o których wiemy, że muszą być prawdziwe, i próbują je jakoś obejść. Wiele kwestii filozoficznych w fizyce kwantowej jest tylko o jeden poziom niżej od naprawdę odjechanych zagadnień, począwszy od pytania Eugene'a Wignera: „Dlaczego w ogóle możemy opisywać świat matematycznie?”[27]. Jeśli tak się postawi sprawy, to faktycznie można się głowić po nocach, czemu wszechświat rządzi się prostymi, eleganckimi, matematycznymi prawami, skoro nie ma po temu żadnych powodów. Ale można też się tym nie przejmować i stwierdzić: „Oto *mamy* proste, eleganckie prawa i możemy robić obliczenia!”. To jest moje podejście.

– Ale czy takie podejście sprawdza się, gdy próbujesz znaleźć nową teorię? – pytam.

– No tak, z tym jest problem – mówi Chad. – Być może należy zastanawiać się nad tymi filozoficznymi kwestiami i rzeczami, których nie da się obliczyć. Ale może też matematyka jest tu po prostu brzydka i ktoś musi się przez nią przegryźć.

W skrócie

• • • Mechanika kwantowa działa świetnie, lecz wielu fizyków utyskuje na jej nieintuicyjność i brzydotę.

• • • Intuicję można budować poprzez doświadczenie, a mechanika kwantowa jest stosunkowo młodą teorią. Może dla przyszłych pokoleń będzie bardziej intuicyjna.

• • • Również w podstawach mechaniki kwantowej nie jest jasne, co właściwie jest problemem wymagającym rozwiązania.

• • • Być może zrozumienie mechaniki kwantowej jest po prostu trudniejsze, niż sądziliśmy.

Rozdział 7

Jedna, by wszystkimi rządzić

W którym próbuję ustalić, czy kogokolwiek interesowałyby prawa przyrody, gdyby nie były piękne. Zatrzymuję się w Arizonie, gdzie Frank Wilczek zdradza mi swoją małą Teoryjkę Czegoś, a następnie lecę na Maui i słucham Garretta Lisiego. Dowiaduję się też paru brzydkich faktów i podliczam fizyków.

Zbiegające się linie

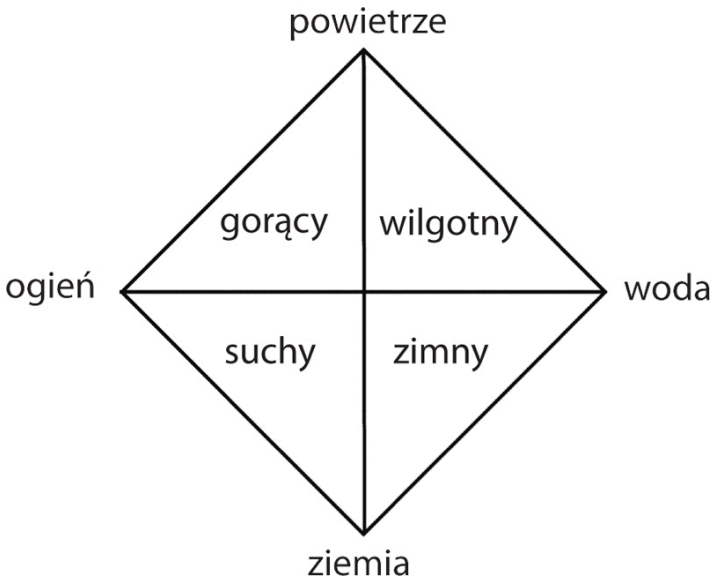
Ostatni raz mieliśmy teorię wszystkiego 2500 lat temu. Filozof grecki Empedokles uczył, że świat jest zbudowany z czterech elementów, zwanych także żywiołami: ziemi, wody, powietrza i ognia. Z czasem Arystoteles dodał piąty, niebiański element: kwintesencję. Wyjaśnianie wszystkiego już nigdy miało nie być równie proste.

W filozofii Arystotelesa każdy żywioł łączy w sobie dwie własności: ogień jest suchy i gorący, woda – wilgotna i zimna, ziemia – sucha i zimna, a powietrze – wilgotne i gorące. Zmiany zachodzą, ponieważ (1) żywioły dążą do swoich naturalnych miejsc: powietrze się unosi, kamienie spadają i tak dalej, oraz ponieważ (2) żywioły mogą zmieniać jedną ze swoich własności, o ile nie prowadzi to do sprzeczności, a zatem suchy i gorący ogień może się przeistoczyć w suchą i zimną ziemię, wilgotna i zimna woda może się przekształcić w wilgotne i gorące powietrze i tak dalej.

Twierdzenie, że kamienie spadają, bo to ich naturalna skłonność, nie wyjaśnia zbyt wiele, ale prowadziło to do

stosunkowo prostej teorii, którą dawało się podsumować za pomocą zadowalająco symetrycznego diagramu (rysunek 11).

Jednak jeszcze w IV wieku przed naszą erą stało się jasne, że to zbyt uproszczony model. Alchemikom udawało się wyizolować coraz więcej substancji i teoria z raptem czterema elementami nie była w stanie wyjaśnić ich różnorodności. Dopiero w XVIII wieku chemicy zrozumieli, że każda substancja stanowi kombinację stosunkowo niewielkiej liczby „pierwiastków”[49*] (wówczas uważanej za mniejszą od stu), których nie da się już rozłożyć na nic mniejszego. Nastała epoka redukcjonizmu.



Rysunek 11. Schematyczne przedstawienie czterech żywiołów Arystotelesa i ich związków, teorii sięgającej IV wieku przed naszą erą. Na podobne klasyfikacje natrafiono w zapiskach cywilizacji Wschodu mniej więcej z tego samego okresu.

W międzyczasie Newton odkrył, że spadanie kamieni i ruch planet mają wspólną przyczynę: grawitację. Joule pokazał, że ciepło jest rodzajem energii, który nieco później udało się sprowadzić do ruchu małych obiektów zwanych atomami; każdemu pierwiastkowi chemicznemu odpowiadał inny typ atomu. Maxwell połączył teorie elektryczności i magnetyzmu w teorię

elektromagnetyzmu. Za każdym razem, gdy wcześniej niepowiązane zjawiska udawało się wyjaśnić w ramach wspólnej teorii, prowadziło to do nowych odkryć i praktycznych zastosowań: pływy są spowodowane przyciąganiem Księżyca, energię można wykorzystać do chłodzenia, obwody mogą generować promieniowanie elektromagnetyczne.

Pod koniec XIX wieku fizycy zauważyli, że atomy mogą emitować i pochłaniać światło jedynie o ściśle określonych długościach fali, ale nie potrafili wytłumaczyć obserwowanej regularności we wzorcach. Usiłując się w nich połapać, stworzyli mechanikę kwantową, która wyjaśniła nie tylko te tak zwane widma atomowe, ale także większość właściwości pierwiastków chemicznych. Do lat trzydziestych XX wieku fizycy ustalili, że wszystkie atomy składają się z jądra zbudowanego z mniejszych cząstek, zwanych neutronami i protonami, otoczonego elektronami. Był to kolejny kamień milowy dla redukcjonizmu.

Kolejną kartę w historii unifikacji zapisał Einstein, który połączył przestrzeń i czas, otrzymując szczególną teorię względności, a następnie scalił z nią grawitację, dostając ogólną teorię względności. W rezultacie pojawiła się potrzeba usunięcia sprzeczności między mechaniką kwantową a szczególną teorią względności, co z czasem doprowadziło do udanego skwantowania elektrodynamiki.

Sądzę, że mniej więcej wtedy nasze teorie były najprostsze. Już wtedy jednak znane było fizykom zjawisko rozpadu promieniotwórczego, którego nie potrafiła wyjaśnić nawet skwantowana elektrodynamika. Do teorii trzeba było wprowadzić nowe oddziaływanie, zwane słabym oddziaływaniem jądrowym, które odpowiadało za rozpady. Później zderzacze cząstek osiągnęły wystarczająco wysokie energie, by badać silne oddziaływanie jądrowe[50*], a fizycy natrafili na całą menażerię cząstek elementarnych[1]. Ten chwilowy wzrost skomplikowania

szybko poskromiono dzięki nowej teorii oddziaływań silnych[51*] oraz zunifikowanej teorii oddziaływań elektrosłabych, które wspólnie ujawniły, że większość odkrytych cząstek jest złożona, zbudowana z ledwie dwudziestu czterech cząstek, które nie są już rozkładalne.

Te dwadzieścia cztery cząstki (dwadzieścia pięć, wliczając dodany później bozon Higgsa) są do dziś uważane za elementarne, a model standardowy wespół z ogólną teorią względności wciąż tłumaczą wszystkie obserwacje. Co prawda podrasowaliśmy nasze modele ciemną materią i ciemną energią, ale jako że nie dysponujemy żadnymi danymi na temat mikroskopowej struktury tych ostatnich, ich uwzględnienie nie przedstawia obecnie większych trudności.

Unifikacja szła jak dotąd tak pomyślnie, że według fizyków następnym logicznym krokiem powinna być teoria wielkiej unifikacji (*grand unified theory*, GUT).

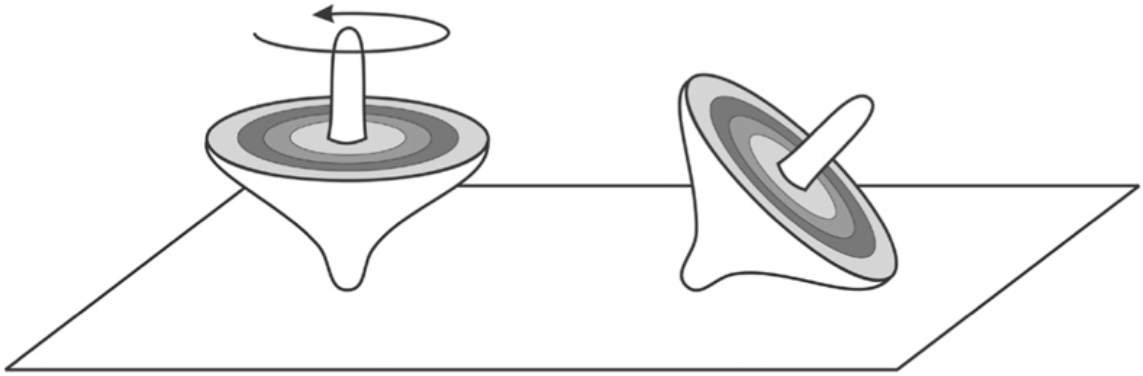
∞∞

Do klasyfikacji symetrii naszych teorii wykorzystuje się pojęcie matematyczne zwane grupą. Grupa zawiera w sobie wszystkie przekształcenia, które nie zmieniają teorii odznaczającej się daną symetrią. Przykładowo grupa symetrii okręgu, znana jako U(1), składa się ze wszystkich obrotów wokół środka tego okręgu.

Jak dotąd w naszej dyskusji na temat symetrii zajmowaliśmy się wyłącznie symetriami równań; symetriami praw przyrody. Jednakże tym, co obserwujemy, nie są same równania – nasze obserwacje są opisywane przez pewne *rozwiązania* tych równań. A z tego, że dane równanie spełnia jakąś symetrię, wcale nie wynika, że jego rozwiązania również muszą ją spełniać.

Rozważmy bączek umieszczony na poziomym stole (rysunek 12). Otoczenie bączka wygląda tak samo we wszystkich

kierunkach równoległych do powierzchni blatu, a zatem równania opisujące jego ruch będą się odznaczać symetrią obrotową względem każdej pionowej osi. Kiedy rozkręcimy bączek, jego ruch obrotowy będzie stopniowo spowalniał wskutek tarcia. Z początku ruch ten rzeczywiście ma symetrię obrotową. W końcu jednak bączek się przewróci i znieruchomieje, wskazując pewien konkretny kierunek. Mówimy, że symetria została „złamana”.



Rysunek 12. Kręcący się bączek, dopóki jest w ruchu, ma symetrię obrotową. Kiedy wytraci energię w wyniku tarcia, symetria ulega złamaniu.

Tego typu spontanicznie łamane symetrie są czymś powszechnym w fundamentalnych prawach przyrody. Jak pokazuje przykład kręcącego się bączka, to, czy układ ma daną symetrię, może zależeć od energii układu. Dopóki bączek ma wystarczającą energię kinetyczną, symetria jest zachowana. Do jej złamania dochodzi dopiero wtedy, gdy wskutek tarcia energia spadnie poniżej pewnego poziomu.

W przypadku symetrii fundamentalnych jest tak samo. Energie, z którymi mamy do czynienia w codziennym życiu, są zdeterminowane przez temperaturę otoczenia, w którym się znajdujemy. Są one znikome z punktu widzenia fizyki cząstek. Na przykład temperatura pokojowa odpowiada około 1/40 elektronowolta, 14 rzędów wielkości mniej od energii zderzeń protonów w LHC. W tak niskiej temperaturze większość

fundamentalnych symetrii jest złamana. Można je jednak „naprawić”, lub jak mówią fizycy: „przywrócić”.

Przykładowo symetria oddziaływań elektrosłabych zostaje przywrócona akurat w energiach osiąganych przez LHC, czego przejawem jest produkcja bozonu Higgsa.

∞∞

Model standardowy wymaga trzech różnych grup symetrii: U(1) i SU(2) dla oddziaływań elektrosłabych oraz SU(3) dla silnych oddziaływań jądrowych. Są to małe grupy, jak można odgadnąć po niewielkich numerach w ich nazwach. Często zdarza się jednak, że większe grupy symetrii zawierają w sobie kilka mniejszych, a zatem może istnieć pojedyncza duża grupa, której symetria ulega złamaniu w wysokich energiach, w efekcie dając w obserwowanych przez nas energiach znany nam model standardowy. Wówczas grupa wielkiej unifikacji byłaby niczym słoń, z którego na razie, przy niskich energiach, znamy ucho, ogon i nogę. Kompletny słoń ukaże się nam dopiero przy energii unifikacji, której wartość szacuje się na 10^{16} GeV, czyli 15 rzędów wielkości powyżej zasięgu LHC.

Pierwsza kandydatka na taką zunifikowaną symetrię posługiwała się najmniejszą grupą zawierającą grupy symetrii modelu standardowego, znaną jako SU(5). Jednakże w modelach ze zunifikowaną symetrią zazwyczaj pojawiają się oddziaływania, w wyniku których protony mogą ulegać rozpadowi. A jeśli protony są niestabilne, to wszystkie jądra atomowe też. W tego typu teoriach unifikacji czas życia protonu może wynosić nawet 10^{31} lat, znacznie więcej niż obecny wiek wszechświata. Niemniej ze względu na prawidła mechaniki kwantowej oznacza to jedynie, że tak długi jest jedynie *średni* czas życia protonów. Innymi słowy, jeżeli tylko ich rozpad jest możliwy, to może także następować szybko, tyle że będzie się to zdarzało rzadko.

W każdej cząsteczce wody jest 10 protonów, a każdy litr wody zawiera 10^{25} cząsteczek. A zatem zamiast czekać 10^{31} lat, aż rozpadnie się pojedynczy proton, możemy monitorować duży zbiornik wody, wypatrując rozpadu jednego z jej protonów. Tego typu eksperymenty prowadzi się już od połowy lat osiemdziesiątych XX wieku, ale jak dotąd bez rezultatu. Z dotychczasowych obserwacji (a raczej ich braku) wynika, że średni czas życia protonów jest dłuższy niż 10^{33} lat. Tym samym unifikacja przy użyciu SU(5) została wykluczona.

W kolejnym podejściu do unifikacji wykorzystano większą grupę, zwaną SO(10), która daje wyższe ograniczenie górne na czas życia protonu. Od tego czasu wypróbowano jeszcze kilka innych grup symetrii, z których część przesuwa czas życia protonu aż do 10^{36} lat, czyli o rzędy wielkości poza zasięg bieżących, a nawet przyszłych eksperymentów.

Oprócz rozpadu protonu teorie wielkiej unifikacji przewidują także nowe cząstki, ponieważ duże grupy mieszczą w sobie więcej niż model standardowy. Jak zwykle zakłada się, że te nowe cząstki są zbyt ciężkie i dlatego jeszcze ich nie wykryto. Obecnie fizycy teoretycy dysponują więc szerokim wyborem teorii unifikacji, których z pewnością nie uda się obalić eksperymentalnie w dającej się przewidzieć przyszłości.

Jednak sama wielka unifikacja nie rozwiązuje problemu z masą Higgsa. Fizycy potrzebują w tym celu supersymetrycznej wersji teorii wielkiej unifikacji. Wiemy, że supersymetria – jeśli faktycznie jest symetrią przyrody – musi być łamana przy wyższych energiach niż te, które do tej pory zbadaliśmy, ponieważ jak dotąd nie znaleźliśmy żadnej z cząstek przewidywanych przez SUSY. Nie wiemy natomiast, przy jakiej energii następuje przywrócenie symetrii – ani czy w ogóle się to odbywa. Jeśli supersymetria ma sprawiać, że masa Higgsa jest naturalna, to energia, przy której SUSY ulega złamaniu, powinna być osiągalna w LHC.

Włączenie supersymetrii do teorii wielkiej unifikacji nie tylko zwiększa ilość symetrii; ma dodatkowo tę zaletę, że nieco wydłuża czas życia protonu. Na przykład niektóre warianty supersymetrycznych modeli opartych na grupie SU(5) wciąż jeszcze dają się pogodzić z obserwacjami. Jednak głównym argumentem na rzecz dołączania supersymetrii jest numeryczna koincydencja, którą omawialiśmy już w rozdziale 4: unifikacja sprzężeń cechowania (rysunek 8).

Ponadto teorie wielkiej unifikacji odznaczają się sztywniejszą strukturą niż model standardowy, co jeszcze bardziej zwiększa ich atrakcyjność. Przykładowo, teoria oddziaływań elektrosłabych nie dostarcza zadowalającej unifikacji, bo wciąż posługuje się dwiema różnymi grupami – U(1) i SU(2) – oraz dwiema stowarzyszonymi z nimi stałymi sprzężenia. Stałe te są ze sobą związane poprzez parametr zwany kątem mieszania oddziaływań słabych[52*], którego wartość w modelu standardowym trzeba znaleźć na drodze pomiaru. Z kolei w większości GUT-ów wartość tego kąta jest wyznaczona przez strukturę grupy i wynosi 3/8 przy energiach wielkiej unifikacji[53*]. Ekstrapolacja tego wyniku na niskie energie zgadza się z danymi eksperymentalnymi.

Według wielu fizyków liczby te nie są przypadkowe. Tak często mówiono mi, że muszą one coś oznaczać, że niekiedy faktycznie w to wierzę. Jest jednak parę „ale”, o których warto wiedzieć.

Przede wszystkim to, jak dobrze stałe sprzężenia zbiegają do wspólnej wartości, zależy od energii, przy której łamana jest supersymetria. Jeśli energia ta jest większa niż około 2 TeV, zbieżność zaczyna się pogarszać. LHC już niemal wykluczył, że łamanie SUSY następuje poniżej tego progu, niszcząc w ten sposób jedną z najatrakcyjniejszych cech tej teorii. Co więcej, jeśli naszym celem jest wielka unifikacja, to nie ma żadnego szczególnego powodu, by wszystkie stałe sprzężenia spotykały się przy tej samej energii – może być bowiem tak, że najpierw

zbiegają się dwie z nich, a trzecia dołącza do nich dopiero potem. Tyle że nie byłoby to zbyt eleganckie, ponieważ trzeba by było wprowadzać kolejną wyróżnioną skalę energii.

Pozwolę sobie wspomnieć, że zbiegające się stałe sprzężenia nie są wyłączną cechą supersymetrii. Zbieżność ta wynika z dodania ciężkich cząstek, które zaczynają odgrywać rolę przy dużych energiach. Możemy wymyślić wiele innych zestawów dodatkowych cząstek, które doprowadzą do przecięcia się naszych krzywych w przestrzeni teorii. W ramach supersymetrii nie mamy jednak swobody wyboru dodatkowych cząstek i zdaniem fizyków taka sztywność przemawia na jej korzyść. Co więcej, przecinanie się wszystkich trzech krzywych dzięki SUSY było efektem, którego w chwili odkrycia nikt się nie spodziewał. A jak już widzieliśmy wcześniej, rzeczy niespodziewane przykuwają uwagę fizyków o wiele bardziej.

Jaki widać, jest więc parę „ale". Jednakże supersymetria ma w sobie coś jeszcze: niektóre z nowych supersymetrycznych cząstek miałyby odpowiednie własności, by stanowić ciemną materię. Zostałyby wytworzone w znacznych ilościach we wczesnym wszechświecie, jako stabilne dotrwałyby do dziś oraz oddziaływałyby bardzo słabo.

A zatem supersymetria łączy w sobie wszystko, co fizycy teoretycy nauczyli się hołubić: symetrię, naturalność, unifikację i niespodziewane odkrycia. Jest swego rodzaju „superbodźcem", jak w biologii trafnie nazywa się sztuczny, lecz nieodparty czynnik pobudzający.

„Supersymetria dostarcza dla tych wszystkich problemów rozwiązania, które jest niezaprzeczalnie prostsze, elegantsze i piękniejsze niż te proponowane w ramach jakiejkolwiek innej teorii. Jeśli nasz świat jest supersymetryczny, wszystkie kawałki układanki świetnie do siebie pasują. Im głębiej studiujemy tę teorię, tym bardziej przekonująca się nam wydaje", pisze fizyk

cząstek Dan Hooper[2]. Według Michaela Peskina, autora jednego z najpowszechniej używanych podręczników do kwantowej teorii pola, SUSY stanowi „kolejny krok w stronę ostatecznej wizji świata, w której wszystko będzie symetryczne i piękne”[3]. David Gross nazywa ją „piękną, »naturalną« i jedyną w swoim rodzaju” oraz uważa, że „gdyby tylko Einstein mógł [poznać supersymetrię], byłby nią zachwycony”[4]. Natomiast Frank Wilczek, choć ostrożniejszy, ma zaufanie do przyrody: „Wszystkie te wskazówki mogą być zwodnicze, ale byłby to strasznie okrutny żart ze strony Matki Natury – a do tego przejaw bardzo złego gustu”[5].

Teoria czegoś

Jestem w Tempe w Arizonie, gdzie jakiś młody mężczyzna właśnie przechodzi przez ulicę na czerwonym świetle. Kierowca autobusu wciska hamulce i gwałtownie przerywa mój ciąg myśli eksplozją przekleństw. Pieszy powoli odblokowuje drogę, gapiąc się w swój telefon. Poprzeklinawszy, kierowca opowiada mi o programie powiększenia uniwersytetu, o coraz większej liczbie studentów pojawiających się na każdym rogu, o nowych usługach adresowanych specjalnie do nich i o nowo budowanych mieszkaniach. Kiwam głową w uznaniu dla wyedukowanych młodych Amerykanów oraz dla starań kierowcy, by ich nie przejechać.

Potem pyta mnie o cel mojej wizyty, a słysząc, że zmierzam na Wydział Fizyki, dopytuje, czy mam coś wspólnego z CERN-em. W zasadzie nie mam, ale mój rozmówca chce jedynie wiedzieć, czy kiedykolwiek tam byłam. Owszem, zdarzyło mi się, obejrzałam nawet tunel i parę magnesów, a także największy detektor ATLAS, który był wtedy wciąż w budowie. Głównie jednak naoglądałam się slajdów i opiłam kawy na konferencji, z której poza tym niewiele pamiętam. Kierowca ma nadzieję kiedyś odwiedzić CERN,

na bieżąco śledzi badania i liczy, że odkryjemy tam coś nowego. Czuję się winna, że jak dotąd nam się nie udało, że prawdopodobnie nam się nie uda oraz że, jak się obawiam, rozczarujemy go. Prawie go przepraszam.

Następnego ranka funduję sobie dwa odciski, gdyż postanawiam raz w życiu nie zakładać adidasów. Docieram na miejsce w samą porę, by się przekonać, że lokal, w którym umówiłam się na spotkanie z Frankiem Wilczkiem, jest zamknięty. Na szczęście nie muszę długo czekać na pojawienie się Franka – w wielkim kapeluszu, machającego na mój widok z drugiego końca ulicy. Chcąc uniknąć kolejnych odcisków, optuję za lokalem obok, w którym mieści się małe bistro oferujące śniadania.

Frank jest na Uniwersytecie Stanu Arizona częstym gościem, a jego obecny pobyt został zorganizowany przez Projekt Origins, ponaddyscyplinarne przedsięwzięcie połączone z silnym programem popularyzacyjnym, poświęcone badaniom kwestii fundamentalnych. Dziś wieczorem weźmie udział w dyskusji panelowej moderowanej przez Lawrence'a Kraussa, dyrektora Origins. Frank to uczony, który nadał aksjonom ich nazwę, ma słabość do ustonogów[54*] i został praktycznie zasypany nagrodami[6]. W roku 2004 zdobył Nagrodę Nobla wspólnie z Davidem Grossem i Hugh Davidem Politzerem za odkrycie, że silne oddziaływanie jądrowe jest „asymptotycznie swobodne", czyli staje się słabsze na krótkich odległościach. Teraz jednak tym, co interesuje mnie w nim najbardziej, jest jego zacięcie artystyczne.

W swojej ostatniej książce, zatytułowanej *Piękne pytanie*, Frank zastanawia się, czy świat „ucieleśnia piękne idee", i odpowiada na własne pytanie gromkim „tak". To jednak już wiem. Chcę się natomiast dowiedzieć, czy także brzydkie idee są przez świat ucieleśniane, a jeśli tak, to czy w tej sytuacji wciąż uważalibyśmy je za brzydkie.

Przetrząsam swój plecak w poszukiwaniu pytań do Franka, które wypisałam sobie w samolocie, ale teraz nie mogę ich znaleźć. Żaden problem, mówię sobie; pewnie i tak ma gotową przemowę. Zagajam więc ogólnikowo:

– Jakie znaczenie ma piękno w fizyce teoretycznej?

Więcej mu nie trzeba.

– Gdy wkraczamy na nieznane obszary rzeczywistości, do świata subatomowego, kwantowego, codzienna intuicja zawodzi – zaczyna Frank. – Recepta polegająca po prostu na żmudnym zbieraniu danych, jak zalecali Francis Bacon i Isaac Newton, przestaje się sprawdzać ze względu na ogromne trudności eksperymentalne. Sposób na pójście naprzód, który działał bardzo dobrze przez większość XX stulecia, opierał się na nadziei, że równania powinny odznaczać się elegancją; że muszą być symetryczne i oszczędne. Z równań wyprowadzano konsekwencje, a te następnie sprawdzano. Tak też postępujemy obecnie: najpierw zgadujemy równania, a potem je sprawdzamy.

– Co czyni teorię elegancką? – pytam. – Wspomniałeś, że musi być oszczędna i odznaczać się symetrią.

– Symetria z pewnością odgrywa tu znaczącą rolę – odpowiada Frank. – Jak wiesz, teorie stały się niezwykle wyrafinowane, mówi się o symetrii lokalnej, czasoprzestrzennej, anomalnej, asymptotycznej... i wszystkie te rodzaje symetrii okazały się bardzo cennymi pojęciami. Istnieje jednak również bardziej podstawowe pojęcie piękna. Poznajesz je, kiedy masz z nim do czynienia. Ma to miejsce wtedy, gdy otrzymujesz z teorii więcej, niż w niej umieściłaś. Innymi słowy, gdy wprowadzasz jakąś koncepcję w celu wyjaśnienia jednej rzeczy, a okazuje się, że tłumaczy ona także coś innego. Wszystko to w jakiś sposób składa się na poczucie, że teoria jest słuszna. Uważam, że w większości przypadków można to uznać za pewien aspekt

piękna – ciągnie Frank – ale to jednak trochę co innego; to oszczędność i prostota.

– Czy twoim zdaniem lepsza teoria będzie musiała być prostsza od tych, którymi dziś dysponujemy?

– Cóż, zobaczymy – mówi Frank. – Decyzja leży po stronie przyrody. Z pewnością liczę na to, że okaże się prostsza. Ale na tę chwilę nie wiadomo. Sądzę, że najpoważniejszą kandydatką na lepszą teorię, lepszą w sensie dostarczania głębokiego sposobu na połączenie grawitacji z innymi oddziaływaniami i rozwiązanie [problemu kwantowania grawitacji], jest teoria strun. [Jednakże] nie jest dla mnie jasne, czym ta teoria jest. To coś w rodzaju nieukształtowanego konglomeratu idei, którego nie da się jeszcze w pełni ocenić pod kątem prostoty lub jej braku, a nawet pod kątem poprawności. W tym momencie z całą pewnością nie wydaje się prosta.

– Byłoby łatwiej zdecydować, gdybyśmy mieli jakieś dane – zauważam.

– Tak, byłoby znacznie łatwiej – zgadza się Frank. – Co więcej, teoria fizyczna, która nie mówi nic na temat fizycznego świata, to dość dziwaczny koncept. Jeśli mówisz, że nie mamy danych, to według mnie nie ma mowy o teorii fizycznej. No bo czego ona dotyczy, skoro danych brak?

– W granicy daje grawitację – odpowiadam, próbując bronić teorii strun. – Więc wiemy chociaż tyle, że w pewnym zakresie parametrów opisuje coś, co widzimy.

– Jeśli wystarczająco obniżymy standardy, to owszem. Ale nie uważam, że powinniśmy się godzić na całą tę ideę fizyki postempirycznej. Moim zdaniem to coś przerażająco okropnego.

Nie wiedziałam, że Frank śledził spór wokół rewidowania metody naukowej, który miał na celu usprawiedliwienie teorii strun.

– Właśnie miałam cię o to spytać. Nie wiem, na ile przysłuchiwałeś się dyskusjom...

– Nie wnikałem w szczegóły. Wystarczyło mi usłyszeć o idei fizyki postempirycznej.

– Pochodzi ona z książki Richarda Dawida, który swoją karierę zaczął w fizyce, ale potem zwrócił się ku filozofii.

Tłumaczę, że według Richarda teoretycy strun postępują racjonalnie, biorąc pod uwagę całość dostępnej informacji, w tym własności matematyczne, w ocenie swojej teorii.

– Ale jaki jest sens teorii, która niczego nie wyjaśnia? – pyta Frank.

– Richard milczy na ten temat.

– Ujmę to tak: gdyby istniał jakikolwiek strzępek dowodu eksperymentalnego, który konkluzywnie przemawiałby na korzyść tej teorii, nikt nie wysuwałby takich argumentów. Bo też nikt by się nimi nie przejął. To taki plan awaryjny. Poddać się i obwieścić zwycięstwo. Wcale mi się to nie podoba.

Rzeczywiście, dyskusja na temat argumentów postempirycznych rozgorzała w obliczu braku argumentów empirycznych. Ale samo uświadomienie sobie tego faktu nie prowadzi nas dalej.

– Ale w sytuacji, gdy nowe eksperymenty są tak trudne i kosztowne, nierealistycznie jest oczekiwać, że tak po prostu uzyskamy jakieś nowe dane – zauważam. – Musimy decydować, gdzie szukać, a w tym celu potrzebujemy teorii. A to nawet przy braku danych prowadzi do pytania, na której teorii powinniśmy się oprzeć. To w tym kontekście Richard twierdzi, iż niektóre teorie są bardziej wiarygodne od innych na podstawie różnorakich dobrych powodów, na które powołują się teoretycy. Na przykład brak alternatyw. Im mniej znaleziono alternatywnych wyjaśnień, tym bardziej prawdopodobne jest, że któraś z zaproponowanych opcji jest poprawna. Przynajmniej zdaniem Richarda. Nie porusza on jednak kwestii estetyki. Co według mnie stanowi poważne

pominięcie, bo fizycy w praktyce posługują się kryteriami estetycznymi.

– Oczywiście. Ale cała ta dyskusja wydaje mi się bardzo abstrakcyjna i całkowicie oderwana od rzeczywistości. Na co nam ona, skoro przecież *istnieją* ekscytujące eksperymenty. Jedne szukają aksjonów, inne usiłują zmierzyć elektryczny moment dipolowy, jeszcze inne wypatrują rzadkich rozpadów, a to tylko fizyka cząstek. Jest jeszcze kosmologia, fale grawitacyjne, dziwne obiekty w kosmosie. Mogą pojawić się najprzeróżniejsze anomalie. Nie potrzebujemy gadających do siebie teoretyków, żeby prowadzić eksperymenty.

Owszem, doświadczenia są, ale od dziesięcioleci nie robią nic poza potwierdzaniem już istniejących teorii. Na ile się rozeznaję, teoretycy gadający za dużo do siebie stanowią zarówno przyczynę, jak i skutek posuchy panującej w kwestii danych.

– Eksperymenty w ostatnich dziesięcioleciach nie przyniosły jakichś spektakularnych, nieprzewidzianych sukcesów – stwierdzam.

– Znaleziono cząstkę Higgsa – mówi Frank.

– Tak, ale to nie wykraczało poza fizykę modelu standardowego – odpieram, nie wspominając już o tym, że przewidziano ją jeszcze w latach sześćdziesiątych.

– Lekkość bozonu Higgsa pośrednio sugeruje supersymetrię – nie daje za wygraną Frank.

– Jednocześnie jest wystarczająco ciężki, by niektórzy zaczęli wątpić w prawdziwość SUSY.

– Tak – zgadza się Frank. – Ale mogło być znacznie gorzej.

– Niemniej nie znaleziono supersymetrycznych partnerów – mówię. – Czy to cię nie martwi?

– Zaczynam się martwić, owszem. Nigdy nie uważałem, że będzie łatwo. Od dawna znane były oszacowania pochodzące

z [eksperymentów w LEP-ie] i obserwacji rozpadu protonu, z których wynikało, że wielu superpartnerów musi być masywnych. Ale mamy kolejną szansę w związku z modernizacją [LHC]. Nadzieja umiera ostatnia.

– Wielu ludzi zmartwiło się brakiem dowodów na SUSY w LHC – mówię – bo oznacza to, że poprawna teoria, jakakolwiek by była, będzie nienaturalna lub związana z precyzyjnym dostrojeniem. Co o tym sądzisz?

– Wiele rzeczy odznacza się precyzyjnym dostrojeniem, którego nie rozumiemy. Z pewnością nie pokładałbym wiary w supersymetrii, gdyby nie unifikacja sprzężeń cechowania, która robi na mnie ogromne wrażenie. Nie mogę uwierzyć, że to przypadek. Niestety obliczenia nie dostarczają precyzyjnej informacji na temat skali masy, przy której supersymetria powinna się pokazać. Niemniej szanse na unifikację zaczną się pogarszać, jeśli superpartnerzy nie zostaną zaobserwowani do około 2 TeV. Dla mnie jest to jakiś powód, by zachować optymizm.

– Czyli nie martwi cię to, że teoria może okazać się nienaturalna?

– Nie, być może jej nienaturalność będzie nieznaczna albo będzie chodziło o jakiś aspekt łamania symetrii, którego nie rozumiemy. To skomplikowane teorie. Myślę, że nauczymy się czegoś z odkryć doświadczalnych. Albo po prostu nauczymy się żyć z nienaturalnością. Sam model standardowy jest już bardzo nienaturalny. Ot, choćby taki [parametr] nadający elektronowi masę wynosi 10^{-6}. Tak już po prostu jest – stwierdza, wzruszając ramionami.

– Więc nie stanowi to dla ciebie problemu.

– Nie. Argumenty na rzecz SUSY byłyby bardziej przekonujące, gdyby, cóż, została odkryta. Albo, co bardziej realistyczne, gdyby w jasny sposób rozwiązywała problem hierarchii. Ale dla mnie

zdecydowanie najpotężniejszy argument stanowi unifikacja sprzężeń, a tego dotychczasowe obserwacje nie wykluczają.

– Czyli – pytam – nie miałbyś nic przeciwko stwierdzeniu, że istnieją jakieś głębsze teorie, których parametry po prostu są takie, jakie są?

– No cóż, koniec końców chcielibyśmy dysponować lepszą teorią. Ponownie: nie musisz mieć teorii wszystkiego, żeby mieć teorię czegoś. Jeśli jednak dana teoria wyjaśnia coś dobrze, to dla mnie to bardzo zachęcający znak.

– Znasz pewnie to powiedzenie Stevena Weinberga o hodowcy koni – mówię.

– O kim? O hodowcy koni? Nie.

– Hodowca koni widział ich wiele w swoim życiu, w związku z czym, jeśli na temat jakiegoś okazu stwierdzi: „To piękny koń", to wie z doświadczenia, że ma przed sobą przyszłego zwycięzcę wyścigów.

– Sądzę – mówi Frank – że pewne rzeczy na temat naszego poczucia piękna potrafimy zrozumieć, nie jest to całkowitą zagadką. Z pewnością wiąże się ono z symetrią, jak również z oszczędnością. Nie powinno być luźnych końców. Ale moim zdaniem próba sformułowania ścisłej definicji jest zbyt ambitna. Czy chcemy dokładnie wskazać obwody w naszym mózgu, które odpowiadają za to, że uznajemy coś za piękne? Zazwyczaj ludzie dochodzą w kwestii piękna do takich samych wniosków.

– Bądź co bądź, jesteśmy wszyscy mniej więcej tak samo oprogramowani – mówię. – Ale czemu nasze poczucie piękna miałoby mieć związek z prawami przyrody?

– Uważam, że jest odwrotnie – odpowiada Frank. – Ludzie radzą sobie lepiej w życiu, jeśli dysponują dobrym modelem przyrody, jeśli ich pojęcia trafnie ujmują faktyczny stan rzeczy. A zatem ewolucja nagradza nas tym specyficznym uczuciem towarzyszącym posiadaniu racji, i właśnie to jest poczucie piękna.

Chcemy wciąż do niego wracać; to nas pociąga. A zatem wyjaśnienia, które okazują się skuteczne, stają się pociągające. W ciągu stuleci ludzie dostrzegli pewne wzorce w tym, co sprawia, że dane idee działają. Więc nauczyliśmy się postrzegać je jako piękne. Do tego dziś przechodzimy jeszcze przez proces treningu, podczas którego dowiadujemy się, co okazało się działać dobrze. Ćwiczymy się w podziwianiu tego, co skuteczne i piękne. Poza tym nasz zmysł piękna rozwija się z doświadczeniem, a za sprawą ewolucji znajdujemy przyjemność w uczeniu się. Oto moja mała teoryjka, dlaczego prawa są piękne. Nie uważam, by była całkowicie błędna. – Na chwilę milknie, po czym dodaje: – Jest jeszcze argument antropiczny. Gdyby prawa nie były piękne, nie odkrylibyśmy ich.

– Pytanie brzmi jednak, czy nie przestaniemy ich odkrywać – mówię. – Dotarliśmy do rzeczy, z którymi nigdy wcześniej się nie zetknęliśmy.

– Nie wiem – odpowiada Frank. – Przekonamy się.

– Czy znasz tę książkę McAllistera? – pytam[Z]. – Autor formułuje zaktualizowaną wersję Kuhnowskiej idei, w myśl której nauka rozwija się przez rewolucje. Zdaniem McAllistera uczeni podczas rewolucji nie pozbywają się wszystkiego; odrzucają jedynie dotychczasową koncepcję piękna w nauce. A zatem ilekroć następuje rewolucja naukowa, muszą zaproponować nową ideę piękna. Podaje parę przykładów: teoria stanu stacjonarnego, mechanika kwantowa i tak dalej. Jeśli to prawda – kontynuuję – to oznacza, że fiksowanie się na ideach piękna z przeszłości jest właśnie najgorszą możliwą decyzją.

– Tak, racja – mówi Frank. – Normalnie jest to dobra zasada przewodnia. Ale zdarza się, że trzeba wprowadzić coś nowego. Aczkolwiek zauważ, że w każdym z tych przykładów nowe idee również były piękne.

– Ale ludzie dostrzegli w nich piękno, dopiero gdy zmusiły ich do tego dane obserwacyjne – zwracam uwagę. – A obawiam się, że tym razem tego nie doczekamy. Zafiksowaliśmy się na przebrzmiałej idei piękna, której używamy w konstrukcji teorii i projektowaniu eksperymentów do ich późniejszego sprawdzania.

– Możesz mieć rację.

Siła w liczbach

Nie bardzo przekonuje mnie mała teoryjka Franka Wilczka na temat tego, czemu prawa są piękne. Jeśli wrażenie piękna miałoby stanowić rozwiniętą w toku ewolucji odpowiedź na skuteczną teorię, to dlaczego tak wielu fizyków teoretyków narzeka na brzydotę modelu standardowego – najskuteczniejszej teorii wszech czasów? I dlaczego dostrzega piękno w chybionych teoriach takich jak unifikacja oparta na SU(5)? Przyznaję, że wyjaśnienie Franka ma w sobie urok, ale to nie oznacza, że jest poprawne.

W każdym razie, nawet jeśli uczymy się postrzegać skuteczne teorie jako piękne, to wcale stąd nie wynika, że możemy wykorzystać nasze poczucie piękna do konstruowania jeszcze skuteczniejszych teorii; oznacza to jedynie, że będziemy konstruować więcej takich samych teorii. „Gdyby prawa nie były piękne, nie odkrylibyśmy ich", powiedział Frank. To mnie właśnie martwi. Wolałabym dysponować nieeleganckim wyjaśnieniem, niż nie dysponować żadnym, ale jeśli Frank ma rację, być może nigdy nie znajdziemy bardziej fundamentalnej teorii, o ile nie jest wystarczająco piękna.

„Ale przecież – ktoś może stwierdzić – zawsze byli tacy uczeni, którzy kurczowo trzymali się pięknych, lecz błędnych teorii. Zawsze było tak, że naukowcy disowali[55*] kolegów, którzy potem okazywali się mieć rację. Zawsze istniała presja grupy, zawsze

istniała konkurencja, zawsze istniały efekt potwierdzenia, syndrom grupowego myślenia, myślenie życzeniowe i pycha zawodowa. Ale na dłuższą metę nie miało to znaczenia. Dobrzy wygrywali, źli przegrywali. Prawda zwyciężała, postęp kroczył dalej. *Science works, bitches*[56*]. Dlaczego tym razem miałoby być inaczej?”

Odpowiedź: dlatego że nauka uległa przeobrażeniu i wciąż się zmienia.

WIĘCEJ NAUKOWCÓW: Najbardziej oczywista zmiana polega na tym, że jest nas więcej. Liczba doktoratów z fizyki przyznawanych rocznie w USA wzrosła od około 20 w 1900 roku do 2000 w 2012 roku, co oznacza z grubsza stukrotny wzrost[8]. Podobnie rzecz się ma z liczbą członków Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego: wzrosła ona z 1200 w 1920 roku do 51 000 w 2016 roku. Dla Niemiec statystyki są analogiczne: Niemieckie Towarzystwo Fizyczne ma dziś około 60 000 członków, a w roku 1900 miało ich 145[9]. Patrząc po liczbie autorów literatury fizycznej, globalna średnia rosła nieco szybciej, bo mniej więcej o czynnik 500 między latami 1920 a 2000[10].

WIĘCEJ ARTYKUŁÓW, WIĘKSZA SPECJALIZACJA: Większa liczba naukowców oznacza większą liczbę publikacji. W fizyce liczba opublikowanych artykułów rośnie o około 3,8–4 procent rocznie od 1970 roku, co oznacza podwojenie istniejącej literatury z grubsza co 18 lat[11]. Czyni to fizykę *wolno* rosnącą dziedziną nauki – to znak, że jest dyscypliną dojrzałą.

W miarę rozrastania się korpus literatury fizycznej rozpadł się na osobne działy (niedawne badanie zidentyfikowało dziesięć głównych), przy czym artykuły z jednego działu przeważnie nie powołują się na prace spoza jego obrębu[12]. Najbardziej samoodnoszącymi się działami są fizyka jądrowa oraz fizyka cząstek elementarnych i pól. Lwia część tematów poruszanych w niniejszej książce podpada pod ten drugi obszar.

Specjalizacja, na którą wskazuje owa fragmentacja literatury fizycznej, zwiększa efektywność, ale może też hamować postęp[13]. W artykule opublikowanym w 2013 roku w „Science” grupa amerykańskich badaczy obliczyła prawdopodobieństwo wystąpienia różnych kombinacji tematów artykułów naukowych, studiując listę cytowanych w danym artykule prac, i przeanalizowała jego wzajemną korelację

z prawdopodobieństwem tego, że dany artykuł okaże się „hitem” (pod którym to pojęciem rozumie się przynależność do 5 procent najlepiej cytowanych prac)[14]. Badacze odkryli, że cytowanie mało prawdopodobnych kombinacji tematycznych jest dodatnio skorelowane z późniejszą popularnością artykułu. Zauważyli też jednak, iż udział publikacji o takiej „niekonwencjonalnej” tematyce spadł z 3,54 procent w latach osiemdziesiątych do 2,67 procent w latach dziewięćdziesiątych, „wskazując na trwałą i znaczącą tendencję ku wysokiej konwencjonalności”.

WIĘCEJ WSPÓŁPRACY: Wzrost całkowitej liczby artykułów wynika przede wszystkim ze wzrostu liczby autorów. Warto jednak odnotować, że w ostatnich latach znacznie wzrosła liczba publikacji na jednego autora, z około 0,8 artykułu na osobę na rok we wczesnych latach dziewięćdziesiątych do ponad dwukrotności tej liczby w 2010 roku[15]. Bierze się to stąd, że fizycy nigdy wcześniej nie pisali tyle wspólnie. Średnia liczba autorów artykułu naukowego we wczesnych latach osiemdziesiątych wynosiła 2,5, a dziś ponad dwa razy tyle. Równocześnie udział artykułów napisanych w pojedynkę zmalał z ponad 30 procent do około 11 procent[16].

MNIEJ CZASU: Coś takiego jak podział pracy jeszcze nie dotarło do środowiska naukowego. Choć naukowcy są wyspecjalizowani, gdy chodzi o tematykę badawczą, w kwestii innych zadań oczekuje się od nich wszechstronności: mają uczyć, opiekować się dyplomantami, kierować laboratoriami, zarządzać grupami badawczymi, zasiadać w niezliczonych komisjach, przemawiać na konferencjach i organizować je oraz – co najważniejsze – pozyskiwać granty, żeby wszystko się kręciło. A to wszystko równocześnie z pracą badawczą i pisaniem artykułów. Ankieta przeprowadzona w 2016 roku przez „Nature” wykazała, że akademicy poświęcają średnio tylko około 40 procent swojego czasu na badania naukowe[17].

Szczególnie czasochłonne jest polowanie na pieniądze. W badaniu z 2007 roku ustalono, że kadra uniwersytecka w Stanach Zjednoczonych i Europie poświęca kolejne 40 procent swojego czasu pracy na aplikowanie o finansowanie badawcze[18]. W badaniach podstawowych proces ten jest szczególnie wyczerpujący ze względu na, dziś często obowiązkowe, snucie proroctw na temat przyszłego wpływu wyników

badań. Przewidywanie przyszłości projektu badawczego dotyczącego podstaw fizyki jest zazwyczaj trudniejsze niż same badania.

Dla nikogo, kto aplikował o fundusze na badania, nie będzie zaskoczeniem, że ankiety wśród pracowników naukowych w Wielkiej Brytanii i Australii ukazały uciekanie się do kłamstwa i przesady jako coś rutynowego w procesie pisania wniosków grantowych. Ankietowani określali to, co deklarowali podczas starania się o grant, jako „szarady" lub „zmyślone historyjki"[19].

MNIEJ DŁUGOTERMINOWEGO FINANSOWANIA: Maleje procent naukowców zatrudnionych na stałe (*tenured*), natomiast rośnie liczba tych z umową na czas określony (*non-tenured*) lub na część etatu[20]. W Stanach Zjednoczonych w latach 1974–2014 udział kadry akademickiej z tej pierwszej kategorii zmalał z 29 procent do 21,5 procent. Równocześnie analogiczny wskaźnik dla kadry pracującej na część etatu wzrósł z 24 procent do ponad 40 procent. Ankiety przeprowadzone przez Amerykańskie Stowarzyszenie Profesorów Uniwersyteckich ujawniają, że brak systematycznego wsparcia zniechęca do długoterminowego zaangażowania i podejmowania ryzyka podczas wybierania tematyki badawczej[21].

Podobna sytuacja panuje w Niemczech. W roku 2005 połowa uczonych zatrudnionych na pełen etat miała umowy krótkoterminowe. Do roku 2015 ich udział wzrósł do 58 procent[22].

MNIEJ HETEROGENICZNOŚCI: Akademicy muszą dziś nieustannie dowodzić swojej wartości poprzez wymierne osiągnięcia. Nie ma to wielkiego sensu, gdyż w niektórych obszarach badań mogą upłynąć stulecia, nim korzyści staną się widoczne. Ponieważ jednak coś trzeba mierzyć, naukowców ocenia się pod kątem ich bieżącego wpływu na dziedzinę, którą reprezentują. Współcześnie używane kryteria sukcesu naukowego silnie zatem zależą od liczby publikacji i wskaźników cytowań, które przeważnie odzwierciedlają produktywność i popularność. Badania sugerują, że ta presja, by publikować i zadowalać innych, zniechęca do innowacji. Łatwiej bowiem publikować i zdobyć uznanie w tematyce dobrze już ugruntowanej, niż iść za nowymi i nietypowymi pomysłami[23].

Inną konsekwencją próby skwantyfikowania doniosłości badań jest zacieranie narodowych, regionalnych i instytucjonalnych różnic, ponieważ stosowane miary naukowego sukcesu są niemal wszędzie takie

same. Oznacza to, że uczeni na całym świecie maszerują obecnie do tego samego rytmu.

Reasumując, mamy więcej ludzi połączonych lepiej niż kiedykolwiek, mierzących się z rosnącą presją, by publikować w specjalistycznych dziedzinach, w sytuacji mniejszego bezpieczeństwa finansowego i w krótszym czasie. Światek naukowy stał się przez to idealną wylęgarnią różnych fenomenów społecznych.

Oto więc moja mała teoryjka czegoś. Naukowcy są ludźmi. Na ludzi silnie wpływają społeczności, do których należą. A zatem naukowcy są pod silnym wpływem społeczności, do których należą. Okej, pewnie nie dostanę za to Nagrody Nobla. Jednak moja teoria skłania mnie do postawienia hipotezy, iż prawa przyrody są piękne, ponieważ fizycy nieustannie wmawiają sobie nawzajem, że takie są.

Przedstawię to z nieco innej perspektywy. Moja mama lubi powtarzać, iż „symetria to sztuka głupców". Co by było, gdybym powiedziała ci, że prawdziwie piękna teoria fundamentalna będzie wysoce chaotyczna, a nie symetryczna? Nie brzmi przekonująco? Stałoby się takie stopniowo, za każdym zasłyszeniem – badania dowodzą, że uznajemy jakieś stwierdzenie za tym bardziej prawdopodobne, im częściej je słyszymy. Mówi się o „tendencyjności uwagi" lub o „efekcie czystej ekspozycji" i co ciekawe (lub przygnębiające; zależy, jak na to spojrzeć), dzieje się tak, nawet jeśli dane stwierdzenie jest powtarzane przez tę samą osobę[24]. Chaos naprawdę jest o wiele piękniejszy od sztywnych symetrii. Zaczynasz się już do tego przekonywać?

Tymczasem fizycy nie zastanawiają się obecnie nad wpływem, jaki na ich opinie wywierają rozpowszechnione przekonania. Gorzej – bywa, że zamiast argumentów naukowych stosują *argumentum ad populum* na poparcie swoich przekonań, jak Giudice, który powołał się na „kolektywny ruch", uzasadniając

adekwatność pojęcia naturalności. Albo jak Leonard Susskind, który w wywiadzie z 2015 roku stwierdził, że „prawie wszyscy aktywni teoretycy zajmujący się fizyką wysokich energii są przekonani, że do wyjaśnienia skomplikowanego świata cząstek elementarnych potrzebne są jakieś dodatkowe wymiary”[25]. Albo jak teoretyk strun Michael Duff, który wyjaśniał: „Możecie być pewni, że gdyby ktokolwiek znalazł jakąś bardziej obiecują ścieżkę [niż teoria strun], to tych tysiąc pięciuset [teoretyków strun] natychmiast by nią podążyło”[57*]. Jak widać, naukowcy ci nie tylko uważają, że skoro wielu ludzi pracuje nad jakąś teorią, to coś w niej musi być, ale w dodatku nie widzą nic niewłaściwego w używaniu takiego argumentu publicznie.

Zwłaszcza supersymetria skorzystała na wsparciu społeczności. Dowiedzieliśmy się tego od Josepha Lykkena i Marii Spiropulu, według których „nie będzie przesadą, jeżeli powiemy, że większość fizyków badających cząstki uważa, że supersymetria *musi* być prawdziwa”[26]. Oddajmy jeszcze głos Danowi Hooperowi: „Ilość czasu i pieniędzy poświęconych na poszukiwanie supersymetrii jest oszałamiająca. Trudno znaleźć fizyka cząstek, który *nie* pracowałby nad nią w którymś momencie swojej kariery [...]. Na całym świecie tysiące badaczy rozmyśla o cudownie supersymetrycznym wszechświecie”[58*].

Alternatywy

Ale nie każdy jest fanem supersymetrii.

Jedna z alternatyw, która wzbudziła zainteresowanie wśród nastawionych bardziej matematycznie, pochodzi od zdobywcy Medalu Fieldsa[59*] Alaina Connesa, który przekonuje, iż supersymetria „to piękne marzenie, ale za wcześnie wierzyć, że jest prawdą”[27]. Connes ma własną teorię unifikacji, która choć zgromadziła paru zwolenników, nie przyjęła się szerzej. Jego idea nie jest zbyt estetyczna, przynajmniej w swojej obecnej formie,

której kulminacyjnym punktem jest 384×384-wymiarowa reprezentacja macierzowa, przez samego Connesa określana jako „przytłaczająca i niezbyt przejrzysta”. Nie pomaga jej też to, że stosowana w niej matematyka jest dość odległa od tego, czego obecnie uczy się studentów fizyki.

Istota idei Connesa jest następująca. W zwykłej teorii kwantów nie wszystko występuje w odrębnych porcjach. Linie obserwowane w widmach atomów – stanowiące historycznie pierwszy dowód skwantowania – są nieciągłe, ale już na przykład położenie cząstki nie jest, albowiem może przyjmować dowolną wartość. Connes nadał położeniu własności kwantowe, ale dokonał tego niebezpośrednio, wykorzystując sposób, w jaki może drgać czasoprzestrzeń. Nie tylko pozwoliło mu to ominąć niektóre standardowe kłopoty z kwantowaniem grawitacji, ale także, co zadziwiające, umożliwiło uwzględnienie pól cechowania znanych z modelu standardowego.

Podejście Connesa działa, ponieważ mody wibracyjne jakiegoś obiektu zawierają w sobie informacje o jego kształcie i zakrzywiona czasoprzestrzeń ogólnej teorii względności nie jest tu wyjątkiem. Gdyby przetworzyć drgania na przykład na fale dźwiękowe, zasadniczo moglibyśmy „usłyszeć kształt bębna” – nawet jeśli nie na własne uszy, to poprzez matematyczną analizę dźwięku[28]. Ale drgania czasoprzestrzeni nie muszą nawet być słyszalne, aby były przydatne. W rzeczywistości nie muszą nawet mieć miejsca. Istotne jest to, że dostarczają alternatywnego sposobu opisu czasoprzestrzeni.

Zaletą tego alternatywnego opisu, znanego jako „geometria spektralna”, jest możliwość jego uzgodnienia z kwantową teorią pola oraz jego uogólnienia na inne przestrzenie matematyczne – również takie zawierające grupy symetrii modelu standardowego. To właśnie zrobił Connes. Znalazł odpowiednią przestrzeń i za jej pomocą udało mu się odtworzyć model standardowy i ogólną

teorię względności dla przypadków, w których je przetestowaliśmy. Sformułował też dodatkowe przewidywania.

W roku 2006 Connes i jego współpracownicy przewidzieli masę Higgsa na poziomie 170 GeV, daleko od wartości 125 GeV zmierzonej w 2012 roku[29]. Niemniej jeszcze przed tym pomiarem masa wynosząca 170 GeV została wykluczona za sprawą rezultatów opublikowanych w 2008 roku, co Connes skomentował wówczas: „Moją pierwszą reakcją jest oczywiście głębokie rozczarowanie, zmieszane z narastającą ciekawością, jaka nowa fizyka zostanie odkryta w LHC”[30]. Po kilku latach zmodyfikował jednak swój model i obecnie przekonuje, iż poprzednia predykcja jest nieważna[31]. Tak czy inaczej, podejście to wypadło z łask.

Jest jeszcze paru dysydentów, którzy obstają przy idei „technikoloru”, zgodnie z którą cząstki obecnie uważane za elementarne posiadają wewnętrzną strukturę zbudowaną z „preonów”, oddziałujących za pośrednictwem siły podobnej do oddziaływania silnego. Idea ta weszła w konflikt z danymi już dziesiątki lat temu, ale niektóre jej warianty przetrwały. Technikolor nie jest dziś jednak szczególnie popularny.

Ponieważ można łączyć fermiony i w ten sposób otrzymywać bozony, ale nie na odwrót, co jakiś czas podejmowane są próby zbudowania całej materii z fermionów, takie jak grawitacja spinorowa albo przyczynowe układy fermionowe[32].

No i jest Garrett Lisi.

Poza kontynent

Jest styczeń, Maui. Czekam na lotnisku na kogoś, kto ma po mnie przyjechać. Dokoła mnie wczasowicze w kolorowych koszulach znikają w hotelowych busach. Mam odwiedzić Pacyficzny Instytut Naukowy dzięki uprzejmości Garretta Lisiego, surfera z własną teorią wszystkiego. Niestety nie mam adresu, a bateria w moim

telefonie znowu padła. Moje włosy kręcą się od wilgotnego hawajskiego powietrza.

Po trzydziestu minutach, gdy właśnie rozważam zdjęcie swojego zimowego płaszcza, przy krawężniku zatrzymuje się kabriolet. Wysiada z niego Garrett z wielkim bandażem na lewym kolanie i kuśtykając, obchodzi samochód.

– Witamy na Maui – mówi, po czym wiesza *lei* na mojej szyi. Następnie wciska moją torbę do bagażnika.

Po drodze do instytutu wyjaśnia, że bandaż kryje dwadzieścia osiem zszywek trzymających w całości to, co zostało z jego kolana. Miał wypadek paralotniarski – coś z wiatrem wiejącym tak zamiast siak – który zakończył się uderzeniem w skały wulkaniczne. Najlepsze w tym jest to, opowiada, że wszystko nagrano, bo stało się to podczas kręcenia filmu dokumentalnego.

Jego instytut okazuje się małym budynkiem na zboczu wzgórza, z werandą (zwaną *lanai*) wychodzącą na duży ogród. W salonie znajduje się biała tablica suchościeralna, a w kuchni – podświetlony czerwony smok. Hol wejściowy zdobią zdjęcia byłych gości. Jest już po zmroku i Crystal, dziewczyna Garretta, wręcza mi latarkę, żebym trafiła do drewnianego domku gościnnego na tyłach. Każe mi uważać na skolopendry.

Następnego dnia wczesnym rankiem budzi mnie kogut i łączę się z wi-fi. Po tygodniu podróżowania bez przerwy moja skrzynka mailowa pęka w szwach od pilnych wiadomości. Mam dwóch niezadowolonych redaktorów żalących się na zaległe recenzje, dziennikarza proszącego o komentarz i studenta proszącego o radę. Jest też formularz do podpisania, spotkanie do przełożenia, dwie rozmowy telefoniczne do odbycia i zaproszenie na konferencję do uprzejmego odmówienia. Mój współpracownik podesłał mi też szkic wniosku grantowego, który powinnam przejrzeć.

Przypominam sobie lekturę biografii herosów minionego stulecia, gdy wyobrażałam sobie fizyków teoretyków jako pykających fajki, rozsiadłych w skórzanych fotelach myślicieli snujących doniosłe myśli. Wspinam się na hamak i tak sobie w nim wiszę, dopóki nie przychodzi mój gospodarz surfer.

∞∞

Garrett kładzie się na jakimś meblu na tarasie, ostrożnie unosząc do góry ranną nogę. Żali się, że od tygodnia nie mógł surfować, i przeprasza, że jest w stanie zabrać mnie na plażę. Zapewniam go, że nic nie szkodzi; nie przyjechałam tu plażować.

– Pamiętasz, jak kiedyś rozmawialiśmy o matematycznym wszechświecie Tegmarka? O tym, że jego zdaniem wszechświat jest zbudowany z matematyki? Powiedziałeś wtedy, że owszem, ale tylko z najładniejszej matematyki.

– Tak właśnie uważam – odpowiada Garrett. – Pozostaje tylko pytanie, które struktury matematyczne są najładniejsze.

– Dlatego właśnie sądzę, że idea Tegmarka jest do niczego – mówię. – Jedynie przeformułowuje pytanie „Które struktury?” na „Gdzie się znajdujemy w matematycznym wszechświecie?”. To praktycznie to samo pytanie.

– Fakt – zgadza się Garrett. – Ciekawie się o tym mówi, ale jeśli nie da się tego przetestować, nie jest to nauka.

– Można by to przetestować, znajdując coś, czego nie da się opisać matematycznie – sugeruję.

– Ha! Tyle że to niemożliwe.

– Rzeczywiście – przyznaję – bo nigdy nie mielibyśmy pewności, czy coś jest nieopisywalne matematycznie, czy też po prostu nie byliśmy w stanie podać takiego opisu. A ty czemu jesteś przekonany, że matematyka może opisać wszystko?

– Wszystkie nasze teorie są matematyczne – mówi Garrett.

– Nawet te chybione – ripostuję.

Niezrażony, Garrett rozpoczyna swoją opowieść.

– Nie zacząłem uprawiać fizyki z fanatycznym zamiarem odkrycia eleganckiej teorii wszystkiego. Zacząłem od pytania „Czym jest elektron?”. Bardzo lubiłem ogólną teorię względności. Ale wtedy zapoznałem się z kwantową teorią pola, a tam jest taki paskudny opis elektronów.

Garrett szukał dla fermionów opisu, który byłby geometryczny w takim sensie jak grawitacja. W ogólnej teorii względności to, co nazywamy siłą ciążenia, stanowi konsekwencję zakrzywiania się czasoprzestrzeni w pobliżu masywnych obiektów. Czterowymiarowa geometria czasoprzestrzeni daje się w pełni uchwycić jedynie przy użyciu abstrakcyjnej matematyki. Niemniej metafora rozciągliwej, gumowej membrany pomaga intuicyjnie pojąć ogólną teorię względności; wydaje się znajoma, niemal namacalna. Co zadziwiające, niektóre cząstki elementarne – bozony cechowania – również da się opisać na podobny, geometryczny sposób (aczkolwiek trzeba w tym celu wykorzystać owe dziwaczne przestrzenie wewnętrzne, które omówiliśmy w rozdziale 3). Takie geometryczne podejście nie działa jednak dla fermionów.

– To było coś, co mnie strasznie raziło w czasach studiów doktoranckich – mówi.

– Czemu cię raziło?

– Bo dotarło do mnie, że wszechświat musi się dać opisać w ramach pojedynczej teorii.

– Dlaczego?

– Wydaje się, że wszechświat powinien stanowić jeden spójny obiekt – tłumaczy Garrett.

– To, że nie podoba ci się, jak modeluje się elektrony, nie stanowi niespójności – zauważam.

– Racja. Ale mnie to się *bardzo* nie podobało.

Garrett mówi, że obecny sposób ujęcia fermionów „nie jest naturalnie geometryczny", podkreślając, iż używa terminu „naturalny" w innym znaczeniu niż fizycy cząstek.

– Fermiony [w dzisiejszych teoriach] nie są naturalnie geometryczne w takim sensie, w jakim są grawitacja i [bozony cechowania]. To mnie raziło, i to bardzo. Natomiast nikomu innemu nie przeszkadzało.

– A co z supersymetrią?

– Przyjrzałem się jej. Sposób, w jaki zazwyczaj się ją definiuje, jest bardzo niezgrabny. Nie jest naturalna w sensie matematycznym. A gdy już wprowadzi się cały formalizm opisujący bozony i fermiony, otrzymuje się wymóg, że każda cząstka musi posiadać supersymetrycznego partnera. A tych nie widzieliśmy. I wciąż nie widzimy – mówi, wyraźnie zadowolony. – Nie byłem więc fanem SUSY. Chciałem znaleźć naturalny opis fermionów. Na tym postanowiłem się skupić po doktoracie. Dlatego właśnie przyleciałem na Maui. Z początku zwróciłem się ku starej teorii Kaluzy–Kleina – opowiada Garrett – myśląc, że jest bardzo elegancka... Wciąż jednak nie potrafiłem poradzić sobie z fermionami[33].

Do tego momentu historia Garretta pod wieloma aspektami przypomina moją. Ja także zaczęłam pracować nad starą teorią Kaluzy–Kleina, zafascynowana jej elegancją, ale niezadowolona ze sposobu, w jaki uwzględnia fermiony. Ale w odróżnieniu od Garretta opłacałam czynsz z trzyletniego stypendium doktoranckiego, a moje życiowe aspiracje były właściwe środkowoeuropejskiej rodzinie z klasy średniej, w której się wychowałam: dobra praca, ładny dom, jedno lub dwoje dzieci, wygodna emerytura i gustowna urna. Może jeszcze po drodze kwantyzacja grawitacji. Na liście nie było jednak przeprowadzki na wyspę.

Kiedy mój entuzjazm do teorii Kaluzy–Kleina nie doprowadził mnie nigdzie po dwóch latach, mój promotor bardzo dobitnie zasugerował, żebym zmieniła temat i zamiast tego zajęła się dużymi dodatkowymi wymiarami – mowa o nowej wersji idei Kaluzy–Kleina autorstwa Arkaniego-Hameda i jego współpracowników, która właśnie nabierała rozpędu. Uznałam, że mój promotor ma rację – i tu moja ścieżka rozchodzi się z drogą Garretta. Dołączyłam do społeczności fizyków cząstek, utrzymywałam się z krótkoterminowych grantów i kontraktów oraz sumiennie i regularnie publikowałam artykuły, których tematyka była odpowiednio na czasie. Garrett wybrał mniej uczęszczaną drogę.

– Po sześciu latach odłożyłem Kaluzę–Kleina całkowicie na bok – wspomina Garrett. – Mogłem tak postąpić, bo byłem wolny od akademickiej bezwładności; bo pracowałem tutaj, na Maui, sam, bez studentów ani grantów.

Garrett zaczął od nowa i spojrzał na cały problem z innej perspektywy. Po latach ciężkiej pracy nastąpił upragniony przełom. Odkrył, że wszystkie znane cząstki – zarówno fermiony, jak i bozony – da się opisać geometrycznie za pomocą jednej dużej symetrii. Przy czym, w odróżnieniu od konwencjonalnych teorii wielkiej unifikacji, jego symetria obejmuje również grawitację.

∞∞

W swojej teorii Garrett posługuje się symetrią największej spośród tak zwanych wyjątkowych grup Liego, oznaczanej jako E_8. Grupy Liego (nazwane na cześć norweskiego matematyka nazwiskiem Sophus Lie [1843–1899]) to szczególnie elegancka odmiana grup, ponieważ da się w nich również uprawiać geometrię, podobnie jak w dobrze nam znanej przestrzeni trójwymiarowej. O to właśnie chodziło Garrettowi.

Istnieje nieskończenie wiele grup Liego. Jednak już pod koniec XIX wieku Wilhelm Killing (1847–1923) i Élie Cartan (1869–1951) podali ich kompletną klasyfikację. Okazuje się, że większość grup Liego należy do jednej z czterech rodzin, z których każda ma nieskończoną liczbę członków. Takimi grupami są na przykład stosowane w modelu standardowym grupy symetrii SU(2) i SU(3), które mają dość podobną strukturę, jak zresztą sugeruje ich nazwa. W istocie dla każdej liczby naturalnej *N* konstruuje się prostą grupę Liego SU(*N*). Poza tą nieskończoną rodziną istnieją jeszcze trzy inne podobne, których szczegółową terminologią nie musimy się tu zajmować. Ważniejszy jest fakt, iż poza tymi czterema rodzinami da się znaleźć pięć „wyjątkowych" grup Liego, oznaczanych jako G_2, F_4, E_6, E_7 oraz – największa – E_8. Można udowodnić, że są to już wszystkie proste grupy Liego, jakie istnieją, i kropka[60*].

Aby docenić, jak dziwaczna to sytuacja, wyobraźmy sobie, że wchodzimy na stronę sklepu internetowego, w którym możemy zamówić tabliczki na drzwi z numerami: 1, 2, 3, 4 i tak dalej, aż do nieskończoności. A poza tym w asortymencie sklepu znajdziemy jeszcze emu, emaliowany kubek oraz wieżę Eiffla. Tak mniej więcej wyglądają wyjątkowe grupy Liego obok czterech uporządkowanych, nieskończonych rodzin.

∞∞

– Napisałem i wrzuciłem do sieci artykuł, który narobił sporo szumu – mówi Garrett, wspominając uwagę mediów, jaką przyciągnęła jego publikacja[34].

Jak przyznaje, w tamtym czasie jego teoria wciąż miała parę niedociągnięć; na przykład opis trzech generacji fermionów nie był do końca zadowalający. To jednak było w 2007 roku. W kolejnych latach Garrettowi udało się rozwiązać niektóre

problemy. Niemniej jego arcydzieło jest wciąż niedokończone; jeszcze nie spełnia wszystkich jego oczekiwań.

– W każdym razie naturalny opis fermionów już mam – mówi Garrett. – Można więc powiedzieć, że udało mi się zrobić to, co sobie postanowiłem po doktoracie. No i znalazłem tę wielką grupę Liego E_8, której się nie spodziewałem. Nie miałem zamiaru poszukiwać eleganckiej teorii wszystkiego, to by było zbyt ambitne nawet dla mnie.

– Cóż, to duża grupa – mówię. – Czy to aż tak zaskakujące, że da w niej zmieścić wiele rzeczy? Może wręcz zbyt wiele? Jak rozumiem, dodatkowe cząstki też tam są?

– Tak, około dwudziestu nowych cząstek – przyznaje, ale spieszy dodać: – czyli mniej niż w SUSY.

– Zakładam, że twoje dodatkowe cząstki są tak masywne, że ich nie obserwujemy?

– W rzeczy samej, tradycyjny wykręt teoretyków. [Ale] działanie jest wyjątkowo piękne[61*]. Przypomina działanie dla powierzchni minimalnej. Pod wieloma względami to najprostsza możliwość. Trudno sobie wyobrazić, by przyroda chciała je modyfikować.

– Skąd wiesz, czego chce przyroda?

– Na tym polega gra. Jeśli chcesz znaleźć teorię wszystkiego, twój zmysł estetyczny to właściwie jedyne, co masz do dyspozycji.

– Co czyni twoją teorię piękną? Wspominałeś o geometrycznej naturalności.

– Tak, jest naturalna, bo można ją w całości wyrazić [geometrią]. No i posługuje się największą wyjątkową prostą grupą Liego. Jest bogata, a mimo to prosta. Co więcej, na różne sposoby głęboko wiąże się z matematyką... to coś pięknego.

– Brzmisz jak teoretyk strun.

– Wiem! Wiem, że brzmię jak strunowiec! Dzielę ich motywacje i pragnienia. Gdybym nabierał rozpędu z tysiącami ludzi przez

trzydzieści lat, pracując nad teorią E_8, i skończyłoby się klapą, byłbym dokładnie w takiej samej sytuacji jak oni dzisiaj.

Po tym, jak opadło początkowe zainteresowanie mediów, Garrett Lisi i jego teoria E_8 szybko ulegli zapomnieniu. Niewielu członków społeczności fizyków okazało jej jakiekolwiek zainteresowanie.

– Nie przyciągnęła zbyt wielkiej uwagi, prawda? – pytam.

– Nie, po tym całym szumie w mediach już nie.

– Czy coś dobrego wynikło z tego szumu?

– Mój ojciec nie pyta mnie już, kiedy wreszcie znajdę pracę – żartuje Garrett. – Bo ja bardzo dobrze radziłem sobie w szkole, zrobiłem doktorat, a potem... pojechałem na Maui i zostałem surferem obibokiem, więc moi rodzice zachodzili w głowę: „Co się stało?". Ale jestem szczęśliwy. Gdy siedzę nad fizyką – ciągnie Garrett – muszę osiągnąć stan, w którym nie myślę o niczym innym, tylko o tym, co mam przed sobą: o matematyce i jej strukturach. Pracując, nie mogę myśleć o żadnych innych aktualnych problemach w moim życiu. W tym sensie daje to ucieczkę.

Jak na surfera obiboka to niezły z niego intelektualista. Nic dziwnego, że internet za nim przepada.

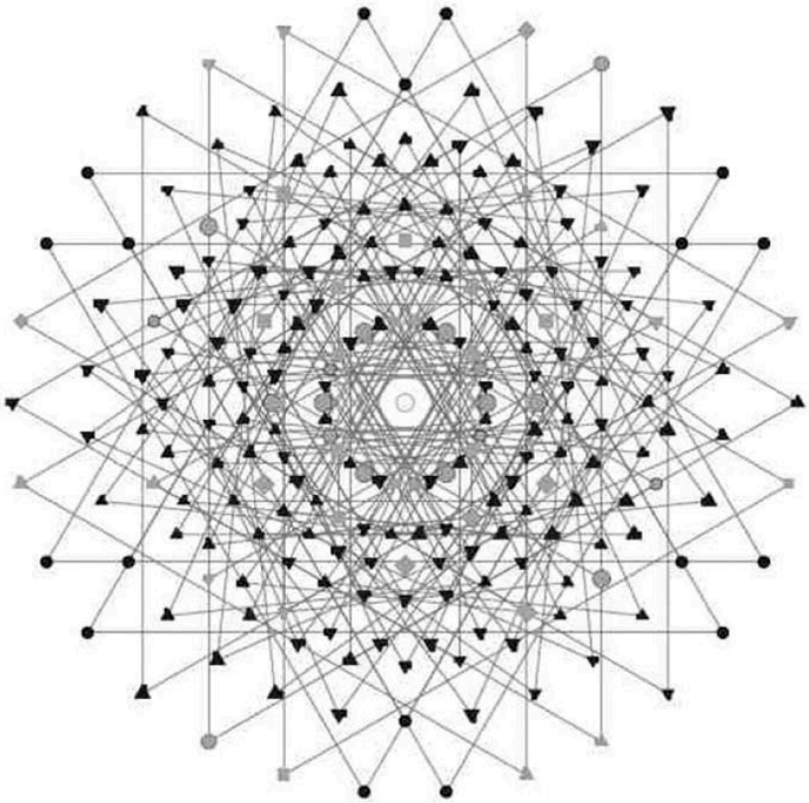
– Rozmawiałaś z Frankiem [Wilczkiem] o naszym zakładzie? – pyta Garrett.

Zupełnie o tym zapomniałam. W lipcu 2009 roku Garrett założył się z Frankiem o tysiąc dolarów, że w ciągu następnych sześciu lat nie uda się znaleźć żadnych cząstek supersymetrycznych.

– LHC miał wtedy te perypetie z magnesami i tak dalej – opowiada. – Więc chociaż termin zakładu upłynął w lipcu zeszłego roku, kończenie go w tamtym momencie wypaczyłoby jego sens, bo dane nie zostały jeszcze zebrane do końca. Uzgodniliśmy, że przedłużamy nasz zakład o kolejny rok.

Czyli zostało jeszcze sześć miesięcy.

– Tak, mówiło się, że LHC z pewnością odkryje supersymetrię – mówię. – Gordy Kane wciąż uważa, że gluina z całą pewnością pojawią się w drugim kursie.



Rysunek 13. Diagram pierwiastkowy grupy E_8, obrazujący teorię wszystkiego Garretta Lisiego. Każdy symbol oznacza cząstkę elementarną. Różniące się symbole odnoszą się do różnych typów cząstek. Linie pokazują, które cząstki są związane trójkowością (*triality*). Nie, ja też nie wiem, co to oznacza, ale wygląda ślicznie, nieprawdaż? (Diagram dzięki uprzejmości Garretta Lisiego).

– Tia – mówi Garrett. – Najbardziej skandaliczne było jego rzekome przewidzenie masy Higgsa, gdy krążyły już plotki o detekcji. Opublikował swój artykuł na dwa dni przed oficjalnym ogłoszeniem odkrycia. A kiedy plotki się potwierdziły, obwieścił, że teoria strun już to przewidziała!

Garrett nie należy do świata zinstytucjonalizowanej nauki, i to widać. Nie martwi się ani o granty, ani o przyszłość swoich studentów, ani o to, czy recenzentom przypadną do gustu jego prace. Po prostu robi swoje i mówi, co myśli. Wielu ludziom się to nie podoba.

W 2010 roku Garrett napisał artykuł o swojej teorii E_8 dla „Scientific American”[35]. Nazywa to „ciekawym doświadczeniem” i wspomina:

– Gdy się okazało, że mój artykuł zostanie opublikowany, teoretyk strun Jacques Distler zebrał grupę ludzi, którzy razem z nim zagrozili bojkotem „SciAm”, jeśli moja praca się ukaże. Redaktorzy wzięli to pod uwagę i poprosili ich o wskazanie, co w artykule jest nie tak. Nic nie było nie tak. Spędziłem nad nim *mnóstwo* czasu, wszystko było absolutnie poprawne. Mimo to podtrzymali swoją groźbę. Koniec końców „Scientific American” zdecydowało się na publikację. O ile mi wiadomo, nie było żadnych reperkusji.

– Jestem zszokowana – mówię z pełną powagą.

– Teoretycy strun są w trudnym położeniu – mówi Garrett – ponieważ obiecywali teorię wszystkiego przez trzydzieści lat, a nic z tego nie wyszło. Myśleli, że po prostu wyskoczą z tymi magicznymi [dodatkowymi wymiarami] i uda im się ogarnąć wszystkie cząstki jeszcze przed obiadem. Teraz mamy cały krajobraz: to kompletna klapa.

A jednak ufność pokładana przez Garretta w matematyce jest bardzo podobna do tej żywionej przez teoretyków strun.

– Czemu jesteś tak mocno przekonany, że istnieje teoria wszystkiego? – pytam.

– Obecny model standardowy to jeden wielki galimatias – odpowiada Garrett. – Zawiera te wszystkie parametry, [macierze mieszania] i masy. Jestem zdania, że istnieje głębsze wyjaśnienie

wszystkich tych pseudolosowych liczb, które doprowadzi nas do zunifikowanej teorii.

– Co jest złego z losowymi wartościami parametrów? Dlaczego teoria musi być prosta?

– Ilekroć braliśmy się do badania coraz mniejszych skal odległości, teoria zawsze się upraszczała – argumentuje Garrett. – W chemii substancje wydają się mieć szereg niezwiązanych właściwości. Ale już na poziomie pierwiastków jest znacznie prościej. A kiedy przyjrzymy się jeszcze mniejszym odległościom, schodząc wewnątrz atomu, prostota zwiększa się jeszcze bardziej. Dziś dysponujemy modelem standardowym, który wydaje się opisywać kompletny zestaw fermionów i bozonów cechowania. Mnie udało się, jak sądzę, znaleźć dobry, geometryczny opis fermionów. Wygląda na to, że wszystko się łączy w jedną strukturę. Dla mnie to po prostu ekstrapolacja dotychczasowej ścieżki nauki. Rzeczy wyglądają prościej na mniejszych skalach odległości.

– To dlatego, że wygodnie zacząłeś od chemii – odpieram. – Jeśli wystartujesz od większej skali, powiedzmy od skali galaktyk, i zaczniesz schodzić niżej, to wcale nie będzie robiło się prościej. Najpierw nastąpi komplikacja, bo natkniesz się na życie płożące się po planetach i tego typu rzeczy. Dopiero poniżej poziomu biochemii wszystko zaczyna się z powrotem upraszczać.

– E, tam, tak nie może być – mówi Garrett. – Wiemy, że cząstki elementarne nie są jak planety. Te pierwsze są dokładnie identyczne.

– Nie ma czegoś takiego jak „dokładnie”, każda teza przyrodnicza ma pewną skończoną dokładność – zauważam. – Ale nie chodzi mi o to, że cząstki elementarne są jak planety – wyjaśniam – tylko o to, że jakkolwiek wygląda teoria na mniejszych odległościach, może nie być prostsza od tego, czym

dysponujemy obecnie. Prostota nie zawsze rośnie wraz z rozdzielczością.

– Okej, może tam być bałagan – zgadza się Garrett. – Ale może też być tak, że za tym bałaganem, który widzimy, stoi jakaś uporządkowana struktura, do której jednak nigdy nie będziemy mieć doświadczalnego dostępu. Na przykład taki Xiao-Gang Wen lubi mówić, że prawa przyrody są fundamentalnie brzydkie. Ale dla mnie taka idea jest odrażająca. Uważam, że jest możliwy prosty, zunifikowany opis zdolny wyjaśnić wszystkie zjawiska.

Zapamiętuję sobie, by skontaktować się z Xiao-Gangiem. W tym momencie na *lanai* pojawia się facet w krótkich spodenkach i hawajskiej koszuli.

– To jest Rob – mówi Garrett, przedstawiając nas sobie. – Przyszedł rozpalić grilla.

Garrett świętuje dzisiaj swoje urodziny i zaprosił grupę znajomych na wspólne pieczenie martwych zwierząt.

– Sądziłam, że grill jest wieczorem – mówię.

– Jego specjalnością są wolno pieczone żeberka – wyjaśnia Garrett – ale ty jesteś wegetarianką, więc raczej ci się to nie spodoba.

– Więc przez całą resztę dnia będzie tu pachniało żeberkami?

– Ano – odpowiada Garrett, machając rękami, jakby próbował mnie odgonić. – Próbuję cię przepędzić na plażę.

∞∞

W końcu idę na tę plażę. Żółwie morskie zerkają spomiędzy fal. Woda jest przejrzysta, a piasek biały, o grubych ziarenkach i dziwacznych kształtach. Dziewczyna Garretta Crystal opowiada mi, że takie ziarenka powstają dzięki małym rybkom zwanym papugorybami, które skubią rafy koralowe, żywiąc się zamieszkującymi je glonami. Gdy już przeżują i przetrawią

fragment korala, wydalają resztki do oceanu. Ich rodzima hawajska nazwa brzmi *uhu paluka-luka*, co w wolnym tłumaczeniu oznacza „ryba-sraczka”. Dorosła papugoryba wytwarza w ten sposób rocznie ponad 350 kilogramów piasku, co przekłada się na wiele tysięcy ton od całej populacji.

Smaruję się obficie kremem do opalania i wtykam palce stóp głęboko w piasek. Myślę sobie, że można tu wyciągnąć pewną lekcję: nawet gówno może być piękne, jeśli zgromadzić go wystarczająco dużo.

W skrócie

- Fizyków teoretyków pociąga idea teorii wielkiej unifikacji scalającej w jedno trzy oddziaływania opisane przez model standardowy. Kilka prób wielkiej unifikacji zostało już obalonych przez dane eksperymentalne, niemniej ona sama pozostaje popularna.
- Wielu fizyków teoretyków uważa, że kierowanie się pięknem da się uzasadnić nabytym doświadczeniem. Ale to ostatnie na nic się nie zda, jeśli poszukiwane nowe prawa natury są piękne w nieznany nam sposób.
- Nauka uległa znacznym zmianom w ostatnich dziesięcioleciach, lecz poszczególne społeczności naukowe nie zaadaptowały się do tych zmian.
- W swoim obecnym kształcie świat nauki zachęca uczonych do zasilania dominujących programów badawczych, natomiast zniechęca do jakiejkolwiek krytyki swojej dziedziny.
- Wsparcie podobnie myślącej społeczności ma istotny wpływ na to, jak naukowcy oceniają użyteczność i perspektywiczność teorii, którymi decydują się zajmować.

Rozdział 8

Przestrzeń, ostateczna granica

W którym próbuję zrozumieć teoretyka strun i prawie mi się udaje.

Tylko skromny fizyk

Jest styczeń, Santa Barbara. Zamierzałam porozmawiać z Josephem Polchinskim podczas grudniowej konferencji w Monachium, ale niedługo wcześniej odwołał swój udział. Gdy docieram do Santa Barbara, zatrudniony w tutejszej filii Uniwersytetu Kalifornijskiego Joe przebywa na zwolnieniu lekarskim.

W ramach mojego stażu podoktorskiego spędziłam w Santa Barbara rok, ale adres, który dał mi Joe, znajduje się w części miasta, w której nigdy nie byłam. Nieruchomości są tu przestronne, krzaczki schludnie przycięte, auta lśniące, a trawa bardzo zielona. Meandruję wąskimi uliczkami u stóp wzgórz, daleko od znajomych dzielnic tanich studenckich mieszkań. Znajduję wreszcie właściwy dom na końcu ślepego zaułka i zatrzymuję się na podjeździe. Jest słoneczne wczesne popołudnie. Obok przejeżdża ogrodnik w pojeździe przypominającym wózek golfowy. Palmy kołyszą się na wietrze.

Tuż przed wciśnięciem dzwonka do drzwi mam chwilę zawahania. Zazwyczaj nie nachodzę chorych ludzi w ich domach. Ale Joe był nastawiony bardzo entuzjastycznie do spotkania, mówiąc, że temat monachijskiej konferencji – brzmiący „Dlaczego ufać teorii?” – chodził mu ostatnio sporo po głowie. Dużą część

swojego życia spędził na studiowaniu matematycznej struktury teorii strun. Przyjechałam do niego, żeby dowiedzieć się, dlaczego powinniśmy ufać matematyce.

∞∞

Krótka historia teorii strun wygląda następująco. Pierwotnie teoria ta powstała jako kandydatka do opisu silnego oddziaływania jądrowego, ale fizycy szybko zorientowali się, że inna teoria – chromodynamika kwantowa – radzi sobie lepiej z tym zadaniem. Zauważyli jednak, że struny oddziaływały ze sobą w sposób, który bardzo przypominał grawitację, i tak teoria strun odrodziła się jako pretendentka do miana teorii wszystkiego. Jej idea głosi, iż wszystkie cząstki są zbudowane ze strun w różnych konfiguracjach, ale szczegóły tej strunowej struktury są tak małe, że nie da się ich zobaczyć przy użyciu obecnie dostępnych energii.

Spójność teorii strun wymagała postulatu, że nasz świat ma nie trzy wymiary przestrzenne, lecz dwadzieścia pięć (plus jeden wymiar czasowy)[1]. Ponieważ tych dodatkowych wymiarów się nie obserwuje, teoretycy założyli ponadto, że mają one skończone rozmiary lub są „ciasno zwinięte” – bardziej przypominają (wielowymiarową) sferę niż nieskończoną płaszczyznę. Ze względu na swoje małe rozmiary i na fakt, iż wysoka zdolność rozdzielcza wymaga wysokich energii, dodatkowe wymiary faktycznie mogły zostać przeoczone w dotychczasowych eksperymentach.

Następnie teoretycy strun odkryli, że aby ich teoria nie dopuszczała do rozpadu próżni, niezbędne jest włączenie do niej supersymetrii. Pozwoliło to obniżyć całkowitą liczbę wymiarów z dwudziestu pięciu do dziewięciu (plus pojedynczy wymiar czasowy), ale wymóg ciasnego zwinięcia pozostał. W związku z tym, że nie zaobserwowano żadnych cząstek supersymetrycznych, teoretycy strun założyli, iż SUSY ulega

złamaniu w wysokich energiach, przez co superpartnerzy, jeśli istnieją, nie są jeszcze widoczni.

Niedługo później zauważono, że supersymetria, nawet jeśli jest łamana w wysokich energiach, prowadzi do niezgodności z eksperymentem, ponieważ dopuszcza oddziaływania, które w modelu standardowym są zakazane i których nie zaobserwowano. Aby temu zaradzić, wynaleziono tak zwaną parzystość R – symetrię, która w połączeniu z supersymetrią po prostu wyklucza te nieobserwowane oddziaływania.

Nie był to jednak koniec problemów. Aż do późnych lat dziewięćdziesiątych teoretycy zajmowali się strunami wyłącznie w czasoprzestrzeniach z ujemną stałą kosmologiczną. Gdy tę ostatnią zmierzono i okazała się ona dodatnia, badacze musieli szybko wymyślić, jak uwzględnić ten fakt. Udało się stworzyć wariant teorii strun dla dodatniej stałej kosmologicznej, ale jej pierwotna wersja z ujemną stałą wciąż jest o wiele lepiej zrozumiana[2]. Większość teoretyków strun do dziś pracuje właśnie nad nią. Niemniej nie opisuje ona naszego wszechświata.

To wszystko nie miałoby znaczenia, gdyby te rozliczne poprawki faktycznie doprowadziły do stworzenia jednoznacznej teorii wszystkiego. Tymczasem fizycy odkryli, że teoria strun dopuszcza olbrzymią liczbę możliwych konfiguracji pochodzących od różnych sposobów zwijania dodatkowych wymiarów, które prowadzą do odmiennych teorii w granicy niskich energii. Ponieważ istnieje tak wiele wariantów konstrukcji teorii – najnowsze szacunki mówią o liczbie 10^{500} – gdzieś wśród nich najpewniej znajduje się model standardowy. Nikomu jednak nie udało się odszukać go w tym gąszczu, a biorąc pod uwagę ogrom możliwości, niewykluczone, iż nigdy się to nie uda.

Reakcją większości teoretyków strun było porzucenie idei, że ich teoria będzie jednoznacznie wyznaczać prawa przyrody. Zamiast tego przyjęli oni hipotezę wieloświata, w którym realizowane są

wszystkie możliwe prawa. Obecnie usiłują skonstruować dla multiwersum taki rozkład prawdopodobieństwa, żeby zgodnie z nim nasz wszechświat był przynajmniej prawdopodobny.

Inni teoretycy strun porzucili zupełnie podstawy fizyki i spróbowali zastosować swoją teorię gdzie indziej – przy użyciu technik strunowych usiłują na przykład opisać zderzenia dużych jąder atomowych (ciężkich jonów). Podczas takich zderzeń (które odbywają się również w LHC) przez krótką chwilę może wytwarzać się plazma kwarków i gluonów. Jej zachowanie trudno wyjaśnić za pomocą modelu standardowego – nie dlatego, że model ten nie działa, lecz po prostu nie wiadomo, jak przeprowadzić potrzebne obliczenia. W związku z tym fizycy jądrowi z radością powitali nowe metody rodem z teorii strun.

Niestety przewidywania dla LHC oparte na teorii strun nie pasowały do danych eksperymentalnych, więc teoretycy po cichu pogrzebali ten kierunek badań[3]. Teraz twierdzą, że ich metody przydają się do zrozumienia zachowania pewnych „dziwnych" metali, ale nawet teoretyk strun Joseph Conlon porównał stosowanie tej teorii w opisie tego typu materiałów do używania mapy Alp podczas wyprawy w Himalaje[4].

Ciągłe dostosowywanie się badaczy teorii strun do sprzecznych z nią dowodów stało się tak zajmujące, że wiele wydziałów fizyki zatrudnia ich ze względu na opinię publiczną, rozmiłowaną w słuchaniu o ich heroicznych wysiłkach wyjaśnienia wszystkiego. Freeman Dyson interpretuje popularność tej tematyki następująco: „[T]eoria strun jest atrakcyjna, bo daje pracę. A dlaczego jest tak wiele ofert pracy w teorii strun? Ponieważ jest tania. Jeśli kierujesz wydziałem fizyki w jakimś odległym miejscu o niewielkim budżecie, nie stać cię na stworzenie nowoczesnego laboratorium fizyki doświadczalnej, ale możesz sobie pozwolić na zatrudnienie paru teoretyków strun. Oferujesz więc parę

stanowisk w tej dziedzinie i tak oto masz nowoczesną jednostkę naukowo-badawczą”[5].

∞∞

Alternatywna historia teorii strun wygląda następująco. Pierwotnie teoria ta powstała jako kandydatka do opisu silnego oddziaływania jądrowego, ale fizycy szybko zorientowali się, że inna teoria – chromodynamika kwantowa – radzi sobie lepiej z tym zadaniem. Zauważyli jednak, że struny oddziaływały ze sobą w sposób, który bardzo przypominał grawitację, i tak teoria strun odrodziła się jako pretendentka do miana teorii wszystkiego.

Co godne uwagi, struny naturalnie łączą się z supersymetrią, którą odkryto niezależnie jako najogólniejsze rozszerzenie symetrii czasoprzestrzennych. Co nawet jeszcze bardziej godne uwagi, choć pierwotnie sformułowano kilka różnych typów teorii strun, okazały się one związane ze sobą „transformacjami dualności”. Transformacje te utożsamiają obiekty opisywane przez jedną teorię z obiektami pojawiającymi się w drugiej, tym samym ujawniając, że są to tylko różne ujęcia jednej i tej samej fizyki. Skłoniło to teoretyka Edwarda Wittena do postawienia hipotezy, że istnieje nieskończenie wiele powiązanych ze sobą wariantów teorii strun, stanowiących aspekty większej struktury ochrzczonej mianem „M-teorii”.

Struny nie przestawały zaskakiwać fizyków. W połowie lat dziewięćdziesiątych badacze zdali sobie sprawę, że ich teoria nie dotyczy wyłącznie jednowymiarowych strun, lecz mieści w sobie także membrany o większej liczbie wymiarów, zwane w skrócie „branami”. Dzięki temu spostrzeżeniu teoretycy mogli przyjrzeć się wielowymiarowym kuzynom czarnych dziur, odtwarzając znane już wcześniej prawa termodynamiki dla tych obiektów. Ta niespodziewana zgodność wyników przekonała nawet sceptyków, że teoria strun ma sens fizyczny. Choć fizyka czarnych dziur wciąż

skrywa wiele tajemnic, teoretycy strun są coraz bliżej ich rozwikłania.

Intuicje fizyczne opierające się na idei strun doprowadziły też do odkryć natury matematycznej, zwłaszcza na temat kształtu dodatkowych, zwiniętych wymiarów, opisywanych za pomocą tak zwanych rozmaitości Calabiego-Yau[6]. Fizycy odkryli na przykład, iż pary geometrycznie bardzo odmiennych rozmaitości Calabiego-Yau są ze sobą związane symetrią lustrzaną – fakt, który umykał matematykom i który dał początek wielu dalszym badaniom. Teoria strun pozwoliła również matematykowi Richardowi Borcherdsowi udowodnić tak zwaną hipotezę *monstrous moonshine*[62*], która wiąże największą znaną skończoną grupę symetrii – grupę monstrum – z pewnymi funkcjami[7]. Głęboki związek między teorią strun a grupą monstrum ostatnio zainspirował uczonych do zbadania potencjalnej użyteczności tej ostatniej w zrozumieniu kwantowych własności czasoprzestrzeni.

Rozwój teorii strun przyniósł także największy przełom w podstawach fizyki w ciągu ostatnich dziesięcioleci – tak zwaną dualność cechowania/grawitacji. Również ta dualność polega na utożsamieniu struktur pojawiających się w dwóch różnych teoriach, ujawniając w ten sposób, iż teorie te opisują w istocie jedną i tę samą fizykę. Głosi ona, że pewne typy teorii grawitacji dają się równoważnie sformułować jako teorie cechowania i *vice versa* [8]. W szczególności oznacza to, iż fizycy mogą wykorzystać ogólną teorię względności do przeprowadzenia obliczeń, które wcześniej były matematycznie niewykonalne.

Wnioski płynące z istnienia tej dualności są wprost zadziwiające, co wiąże się z tym, iż dwie związane nią teorie operują różną liczbą wymiarów: czasoprzestrzeń teorii cechowania ma o jeden wymiar przestrzenny mniej niż czasoprzestrzeń teorii grawitacji. Oznacza to, że nasz wszechświat – włącznie z nami – daje się matematycznie ścisnąć do dwóch wymiarów

przestrzennych. Wszechświat jest więc niczym hologram, który tylko wydaje się trójwymiarowy, ale w rzeczywistości daje się zakodować na płaszczyźnie.

I nie chodzi tu tylko o nowy obraz świata. Teoretycy strun zastosowali dualność cechowania/grawitacji również do takich układów jak plazma kwarkowo-gluonowa czy nadprzewodniki wysokotemperaturowe i choć nie otrzymano jeszcze wyników ilościowych, wyniki jakościowe są obiecujące.

Obie historie są prawdziwe. Ale zabawniej jest wybrać sobie jedną, a drugą ignorować.

∞∞

Oprócz napisania jednego z pierwszych podręczników teorii strun Joe Polchinski odegrał znaczącą rolę w jej rozwoju, albowiem to właśnie on wykazał, że opisuje ona nie tylko obiekty jednowymiarowe, lecz także membrany o większej liczbie wymiarów. Ledwie parę dni temu opublikował artykuł, w którym wyłożył swoje przemyślenia na temat przydatności kryteriów nieempirycznych podczas oceniania, czy jakaś teoria jest obiecująca, przy czym przez „jakąś teorię" rozumie teorię strun.

Ściskam dłonie jego żony i syna. Zdjąwszy buty, przemykam na paluszkach po dywanie i zapadam w kanapę.

– Co myślisz o idei nieempirycznej oceny teorii pochodzącej od Richarda Dawida? – zagajam.

– Nie wiem, co te słowa oznaczają – odpowiada Joe. – Jestem tylko skromnym fizykiem próbującym zrozumieć świat. Ale sądzę, że to, co mówi, jest bliskie mojemu własnemu sposobowi myślenia. Gdy zadaję sobie pytania: „Nad czym chcę pracować, bazując na wszystkich przesłankach zgromadzonych w ciągu życia? Które kierunki są najbardziej obiecujące? Które mają największe szanse powodzenia?", to muszę dokonywać tego typu

oceny. Uważam, iż istnieją pozytywne przesłanki, a naliczyłem ich sześć rodzajów, że teoria strun jest właściwym kierunkiem[9]. Niektóre rzeczy głoszone przez Dawida wydają się zbieżne z tym, co sam myślę na ten temat. Jednocześnie te określenia, „nieempiryczna”... Nie zastanawiam się nad nimi.

Spogląda na mnie oczekująco.

– Moim zdaniem Dawid ma na myśli dokładnie to, co powiedziałeś – zgadzam się. – To jasne, że bierzemy pod uwagę nie tylko twarde dane, prawdopodobnie zawsze tak było. Teraz jednak odstęp czasowy między stawianiem i testowaniem hipotezy bardzo się wydłużył, co sprawia, że ocenianie teorii na podstawie czegoś innego niż dane staje się coraz istotniejszą kwestią.

– Tak – mówi Joe. – [Max] Planck ponad sto lat temu zdał sobie sprawę, że rozziew między skalą dostępną dla ówczesnych pomiarów a skalą, do której najpewniej będziemy musieli dotrzeć, wynosi dwadzieścia pięć rzędów wielkości[63*]. Dziś zostało nam jeszcze piętnaście. Istnieje spora nadzieja, że uda się coś dostrzec przy niższych energiach. To twój obszar, fenomenologia grawitacji kwantowej: próba przewidzenia wszystkich możliwych obserwowalnych efektów, które dałoby się wyłapać przy osiągalnych energiach. To coś, czego wszyscy pragniemy. Niestety wszystkie dotychczasowe rezultaty są negatywne. Sądzę – ciągnie – że ze wszystkich sił starasz się oddzielić pomysły, które wydają się dobre, od tych, które się takie nie wydają. Szczerze uważam cię za kogoś, kto się na tym polu nie oszczędza. To bardzo ważna praca. I jednocześnie naprawdę niewdzięczna, bo liczba złych pomysłów rośnie znacznie szybciej niż liczba dobrych. No i niekiedy zrozumienie, czemu dany pomysł jest chybiony, zajmuje o wiele więcej czasu niż samo zaproponowanie czegoś błędnego.

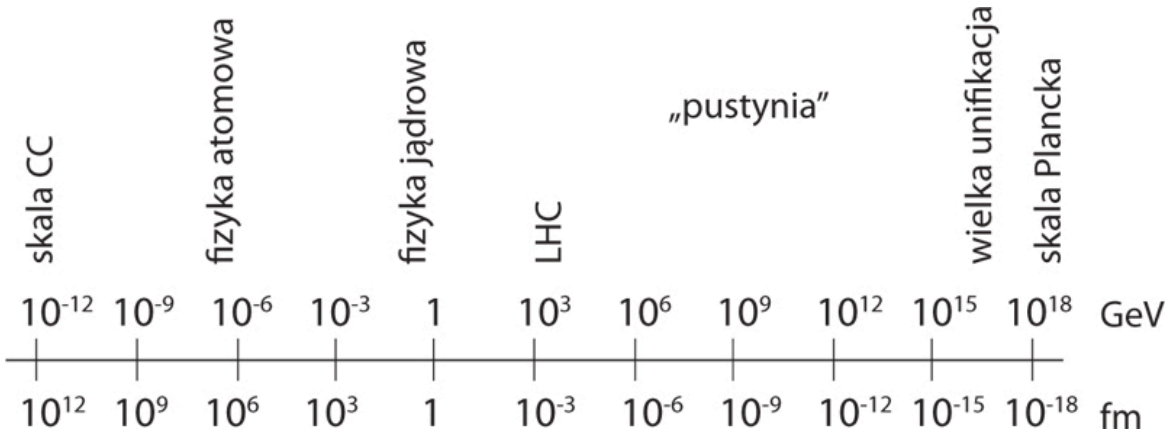
To chyba najmilszy sposób, w jaki kiedykolwiek powiedziano mi, że jestem głupia.

– Wszyscy ludzie od fenomenologii – kontynuuje Joe – mierzą się z tym samym problemem: muszą sięgać ponad brakującymi piętnastoma rzędami wielkości. To jest arcytrudny problem. W przypadku fenomenologii strunowej mamy do czynienia nie tyle z teorią, ile z pewnymi okrojonymi modelami, które w przyszłości być może staną się częścią teorii. I nie chodzi o to, że teoretycy robią coś nie tak, tylko po prostu uprawianie fenomenologii jest niezwykle trudne. Z tego powodu każdy aspekt tego zagadnienia wymaga od nas myślenia w kategoriach znacznie dłuższych skal czasowych, niż jesteśmy przyzwyczajeni.

– A to wszystko przez Plancka. Gdyby tylko wyszła mu mniejsza liczba...

∞∞

Przy energii Plancka powinniśmy zacząć dostrzegać kwantowe fluktuacje czasoprzestrzeni. Wynosi ona nieco ponad 10^{18} GeV, co jest gigantyczną wartością w porównaniu do energii osiągalnych w zderzaczach (por. rysunek 14). Obszar rozpięty między energiami dostępnymi obecnie a tymi, przy których wielka unifikacja i grawitacja kwantowa powinny być istotne, często nazywa się „pustynią” (*the desert*), ponieważ, na ile dziś nam wiadomo, może on odznaczać się brakiem jakichkolwiek nowych zjawisk.


skala CC
fizyka atomowa
fizyka jądrowa
LHC
„pustynia"
wielka unifikacja
skala Plancka
10-12 10-9 10-6 10-3 1 103 106 109 1012 1015 1018 GeV
1012 109 106 103 1 10-3 10-6 10-9 10-12 10-15 10-18 fm

Rysunek 14. Skale energii. CC oznacza stałą kosmologiczną (*cosmological constant*).

Gdybyśmy chcieli bezpośrednio osiągnąć energię Plancka, potrzebowalibyśmy zderzacza cząstek mniej więcej rozmiarów Drogi Mlecznej. Z kolei gdybyśmy chcieli zmierzyć kwant pola grawitacyjnego – tak zwany grawiton – musielibyśmy dysponować detektorem wielkości Jowisza, i to umieszczonym nie byle gdzie, lecz na orbicie silnego źródła grawitonów, takiego jak gwiazda neutronowa. Jasne jest, że nie są to eksperymenty, na które uda się w najbliższej przyszłości pozyskać finansowanie. W związku z tym wielu fizyków jest pesymistami, gdy mowa o szansach doświadczalnego testowania grawitacji kwantowej, a to prowadzi do pytania natury filozoficznej: skoro nie możemy jej testować, to czy leży ona w obrębie nauki?

Jednak niewielu fizyków teoretyków przejmuje się tym pytaniem, chodzi tu bowiem nie tylko o estetykę – jest to także kwestia spójności.

Model standardowy i ogólna teoria względności rozważane razem wykazują wewnętrzne sprzeczności, które powyżej energii Plancka nie są w stanie niczego opisać. Wiadomo zatem, że proste łączenie tych dwóch teorii jest błędne i musi istnieć lepszy sposób, by je scalić.

Źródłem sprzeczności jest to, że ogólna teoria względności nie jest teorią kwantową, ale mimo to musi uwzględniać materię i promieniowanie, które mają własności kwantowe. Zgodnie z modelem standardowym taki na przykład elektron może znajdować się w dwóch miejscach naraz, ponieważ jest opisany funkcją falową. Z kolei według ogólnej teorii względności masa elektronu zakrzywia czasoprzestrzeń wokół niego. Ale wokół którego położenia? Teoria Einsteina nie potrafi odpowiedzieć na to pytanie, bo zakrzywienie nie ma właściwości kwantowych i nie może być w dwóch miejscach naraz.

Nie jesteśmy w stanie zmierzyć tego efektu, gdyż przyciąganie grawitacyjne pochodzące od elektronu jest zbyt słabe, ale nie ma to znaczenia – teoria powinna dawać jednoznaczne odpowiedzi bez względu na to, czy da się ją testować.

Wymóg spójności teorii potrafi niekiedy dostarczać potężnych wskazówek. Tego typu przewidywaniem z konieczności był na przykład bozon Higgsa. Bez niego model standardowy staje się wewnętrznie niespójny w skalach energii osiągalnych w LHC, ponieważ wyniki pewnych obliczeń nie dają się wówczas pogodzić z interpretacją probabilistyczną[10]. Wiedzieliśmy więc, że w LHC coś się musi wydarzyć.

Jako że twierdzenia są tylko tak silne, jak ich założenia, nie było możliwe ścisłe przewidzenie, co konkretnie nastąpi w LHC. Mogłoby to być coś innego niż bozon Higgsa – na przykład oddziaływanie elektrosłabe mogłoby okazać się nadspodziewanie silne. Wiedzieliśmy jednak, że *coś* musi się wydarzyć, bo nasze dotychczasowe teorie traciły spójność. Można oczywiście wytężyć mózg i spróbować wyobrazić sobie przyrodę przejawiającą rzeczywistą niespójność logiczną albo posłuszną jakiejś bardziej skomplikowanej logice. Niemniej to także byłoby „coś nowego”.

Jednakże oczekiwanie, że oprócz bozonu Higgsa w LHC powinny pojawić się jakieś inne nowe cząstki, zrodziło się nie

z konieczności, lecz z przekonania, że natura stara się unikać precyzyjnie dostrojonych parametrów.

∞∞

– Masa Higgsa stanowi wielkie zaskoczenie – mówi Joe – bo jak dotąd nie natrafiono na supersymetrię. Jednocześnie wiemy już, że nawet jeśli ją teraz odkryjemy, będzie się wiązać ze znacznym dostrojeniem. Nie wiem, co o tym myśleć. Ale nie mam też lepszej odpowiedzi. Duży problem stanowi stała kosmologiczna. No i trzeba coś zrobić z masą Higgsa. Z początku mieliśmy dwa pomysły na rozwiązanie problemu z masą Higgsa: technikolor i supersymetrię. Według pierwszego cząstki elementarne były w istocie złożone. Niestety szybko stawało się to skomplikowane i mało obiecujące. Teraz jednak to samo dzieje się z supersymetrią. Kiedyś była czymś pięknym, bardzo łatwo było jej kibicować, ale teraz staje się to coraz trudniejsze. Wciąż liczę na to, że ją znajdziemy. A wtedy może zrozumiemy, czemu manifestuje się w wysokich energiach w subtelniejszy sposób, niż oczekiwaliśmy. Nie mam pojęcia, dlaczego supersymetria nie została zaobserwowana ani co to oznacza na przyszłość. W tej chwili wszyscy są podekscytowani tym pikiem w 750 GeV[64*]. Wiesz, jak to jest.

– Co czyni SUSY tak piękną? – pytam.

– Zawsze jestem trochę ostrożny, używając takich określeń jak „piękno”. Są źle zdefiniowane – mówi Joe. – Napisałem kiedyś pracę przeglądową o dokonaniach Diraca[11]. Piękno stanowiło dla niego silną motywację. Pod koniec artykułu napisałem, że „[c]złowiek potrafi rozpoznać piękno, gdy je widzi, i tu tak właśnie jest”. Ale w pewnym sensie unikam tego słowa. Sądzę, że przykładam mniejszą wagę do motywacji geometrycznych niż większość teoretyków. Najbardziej uderzające są dla mnie idee łączące ze sobą rzeczy, między którymi nie było wcześniej

żadnego oczywistego związku. Wiedząc, że w świecie występują bozony i fermiony, i ekstrapolując dotychczasowy rozwój naszej dziedziny, nie zdziwiłbym się, gdyby te dwa typy cząstek udało się ze sobą powiązać. Supersymetria dostarczyła dokładnie takich związków, na jakie liczono. Wyjaśniła, w jaki sposób fermiony i bozony łączą się ze sobą oraz dlaczego bozon Higgsa jest stosunkowo lekki. Miała również potencjał, by wyjaśnić stałą kosmologiczną. To się jednak nie powiodło i obecnie nikt nie ma dobrego pomysłu, jak to zrobić...

Milknie. Po chwili stwierdza:

– Może po prostu to wszystko jest prawdą w wyższych energiach, ale nie stosuje się do tego, co możemy dziś obserwować.

Przez jakiś czas patrzy przeze mnie, na widok za oknem. Potem nagle pyta, czy mam ochotę na filiżankę kawy albo coś innego do picia. Uprzejmie odmawiam, a on sięga po jakieś notatki.

Niewzruszone ściany ognia

Przygotowując się do konferencji w Monachium, Joe skompilował listę matematycznych poszlak przemawiających na korzyść teorii strun. Lista ta, jak zauważam, wpisuje się w sposoby rozumienia piękna, o których już słyszałam.

Jak mówi mi Joe, teoria strun przekonuje go przede wszystkim dlatego, że udaje jej się skwantować grawitację, a jest to problem, z którym radzi sobie niewiele modeli. Co więcej, kiedy już się zaakceptuje ideę strun, nie ma zbyt dużo swobody w konstrukcji teorii. Sądzę, że te dwa powody dobrze oddają koncepcję „sztywności", o której wspominali Nima Arkani-Hamed i Steven Weinberg.

Joe napomyka następnie, że inną korzystną cechą teorii strun jest jej geometryczność – aspekt, który był tak ważny dla Garretta

Lisiego – przy czym dodaje, że dla niego „nie jest aż tak istotna”.

Kolejne dwa punkty na liście Joego dotyczą tego, co nazywa „powiązaniami” (*connections*), a co filozof Richard Dawid określał mianem „domknięcia eksplanacyjnego”. To dzięki nim teoria zaskakuje i może być uznana za elegancką. Powiązania, które wymienia Joe w kontekście teorii strun, to (1) nowy wgląd uzyskany dzięki dualności cechowania/grawitacji („Żyjemy w hologramie”) oraz (2) wkład do termodynamiki czarnych dziur.

∞∞

Czarne dziury powstają, gdy dostatecznie duża ilość materii zapadnie się pod działaniem własnego przyciągania grawitacyjnego. Jeśli zbiorowisku materii nie uda się wytworzyć wystarczającego ciśnienia wewnętrznego – czego przykładem jest gwiazda, która wyczerpała całe swoje paliwo – może ono ulegać dalszemu kolapsowi, aż do pojedynczego punktu. Z chwilą gdy koncentracja materii przekroczy pewien próg, siła grawitacji na jej zewnętrznej powierzchni stanie się tak silna, że nawet światło nie będzie mogło uciec: rodzi się czarna dziura. Granicę tego obszaru-pułapki nazywa się „horyzontem zdarzeń”. Promień światła wysłany dokładnie z horyzontu także nie jest w stanie odlecieć, lecz zamiast tego krąży dookoła po wsze czasy, a skoro nic nie porusza się szybciej od światła, to nic nie wydostanie się z wnętrza czarnej dziury.

Horyzont nie stanowi fizycznej granicy. Nie jest substancją, a jego obecność można wywnioskować tylko z pewnej odległości, a nie zbliżając się do niego. W istocie można nawet nie zauważyć, że się go przekroczyło, zakładając, że czarna dziura jest wystarczająco duża. Wynika to stąd, że podczas swobodnego spadku nie odczuwamy sił przyciągania grawitacyjnego, lecz tylko ich różnice, czyli tak zwane siły pływowe. Siły te są odwrotnie

proporcjonalne do masy przyciągającego ciała: im masywniejsza czarna dziura, tym mniejsze siły pływowe.

Wpadając do supermasywnej czarnej dziury – takiej jak ta w centrum Drogi Mlecznej – siły pływowe z początku byłyby tak słabe, że przegapilibyśmy moment przekraczania horyzontu zdarzeń. Przyjmując, że zanurkowaliśmy na główkę, grawitacja ciągnęłaby naszą głowę nieco silniej niż stopy, więc podlegalibyśmy rozciąganiu. Na samym horyzoncie to rozciąganie jest znikome. Zaczyna robić się nieprzyjemne w miarę zbliżania się do centrum czarnej dziury, ale wtedy odwrót jest już niemożliwy. Techniczny termin na określenie przyczyny naszego zgonu to „spaghettifikacja".

Kiedyś czarne dziury był tylko spekulacją, ale w ciągu ostatnich dwudziestu lat astronomowie zgromadzili przytłaczające dowody na ich istnienie, i to zarówno czarnych dziur gwiazdowych (powstałych w wyniku kolapsu wypalonych gwiazd), jak i ich supermasywnych sióstr (o masach od 1 miliona aż do 100 miliardów mas naszego Słońca). Supermasywne czarne dziury znajdują się w centrach większości galaktyk, aczkolwiek wciąż nie jest jasne, w jaki sposób uzyskują aż takie rozmiary. Ta w naszej własnej Galaktyce nosi nazwę Sagittarius A^* (*wym.* A z gwiazdką).

Najlepszym dowodem empirycznym na istnienie czarnych dziur, jakim dziś dysponujemy, są orbity gwiazd i gazu w ich pobliżu w połączeniu z brakiem promieniowania, które powinno do nas docierać od materii zderzającej się z jej powierzchnią. Kształt orbit zdradza nam, jak wielka masa jest skoncentrowana w obserwowanym obszarze, natomiast brak promieniowania świadczy o tym, że ów masywny obiekt nie może mieć twardej powierzchni[65*].

Jednakże czarne dziury fascynują nie tylko doświadczalników, lecz także teoretyków. Tych ostatnich najbardziej intrygują konsekwencje obliczeń przeprowadzonych przez Stephena

Hawkinga. W roku 1974 Hawking wykazał, że choć nic nie może wydostać się spod horyzontu zdarzeń, czarna dziura wciąż może tracić masę wskutek wypromieniowywania cząstek. Cząstki owego „promieniowania Hawkinga", jak je dziś nazywamy, powstają w wyniku kwantowych fluktuacji pól materii w pobliżu horyzontu. Są kreowane parami kosztem energii pola grawitacyjnego. Raz na jakiś czas jednej z cząstek z pary udaje się uciec, podczas gdy druga wpada pod horyzont, co sumarycznie prowadzi do spadku masy czarnej dziury. Promieniowanie to składa się z najróżniejszych typów cząstek i daje się scharakteryzować za pomocą swojej temperatury, która jest odwrotnie proporcjonalna do masy czarnej dziury – co oznacza, że mniejsze okazy są gorętsze oraz że czarna dziura podgrzewa się w trakcie parowania.

Pragnę podkreślić, że promieniowanie Hawkinga *nie* jest spowodowane kwantową naturą grawitacji, lecz raczej bierze się z kwantowej natury materii umieszczonej w zakrzywionej, niekwantowej czasoprzestrzeni. Innymi słowy, wynika z obliczeń przeprowadzonych przy użyciu dwóch teorii, które są już dobrze potwierdzone.

Dlaczego parowanie czarnych dziur tak fascynuje teoretyków? Ma to związek z tym, że promieniowanie Hawkinga nie zawiera żadnej informacji (poza samą wartością temperatury); jest całkowicie losowe. Tymczasem według teorii kwantów informacja nie może zostać zniszczona. Może co prawda ulec takiemu wymieszaniu, że w praktyce nie da się jej odzyskać, ale zasadniczo w mechanice kwantowej obowiązuje zasada zachowania informacji[12]. Jeśli spalisz książkę, zawarta w niej informacja tylko wydaje się stracona – w rzeczywistości przekształca się w dym i popiół. Chociaż spalona książka do niczego ci się już nie przyda, nie ma tu sprzeczności z teorią

kwantów. Jedyny znany nam proces, w którym informacja faktycznie ulega zniszczeniu, to parowanie czarnych dziur.

I oto zagadka: spróbowaliśmy połączyć grawitację z kwantową teorią materii i rezultat okazał się niezgodny z tą drugą. Coś trzeba odrzucić, ale co? Większość fizyków teoretyków – wliczając mnie – sądzi, że do rozwiązania tego problemu potrzebujemy teorii grawitacji kwantowej.

Aż do roku 2012 wielu teoretyków strun było przekonanych, że udało się rozwiązać problem utraty informacji za pomocą dualności cechowania/grawitacji. Zgodnie z nią cokolwiek dzieje się podczas powstawania i parowania czarnej dziury, można równoważnie opisać w języku teorii cechowania. W ramach tej teorii procesy są jednak odwracalne, a zatem parowanie czarnych dziur także musi takie być. Co prawda nie tłumaczy to sposobu, w jaki informacja wydostaje się spod horyzontu, ale pokazuje, że w ramach teorii strun problem nie istnieje. Co więcej, używając tej metody, teoretycy mogą nawet policzyć, na ile sposobów można zrobić czarną dziurę – zliczyć jej „mikrostany” – i wynik doskonale zgadza się z rezultatami Hawkinga dotyczącymi temperatury.

Wszystko wyglądało dobrze, aż wydarzyło się coś niespodziewanego: jak dowodziły obliczenia Joego Polchinskiego i współpracowników z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Santa Barbara, to, co teoretykom strun wydawało się poprawnym wyjaśnieniem, musi zawierać błąd[13].

Promieniowanie Hawkinga – o ile nie zawiera informacji – jest kompatybilne z ogólną teorią względności, zgodnie z którą spadający swobodnie obserwator nie powinien zauważyć przekraczania horyzontu zdarzeń. Jednak Polchinski i jego koledzy wykazali, że jeśli zmusi się promieniowanie Hawkinga do niesienia informacji, to horyzont musi być najeżony wysokoenergetycznymi cząstkami spalającymi natychmiast wszystko i wszystkich, którzy

się do niego zbliżą – czarne dziury byłyby otoczone czymś, co nazwano „ścianą ognia” (*firewall)*.

Hipoteza ściany ognia wpędziła teoretyków strun w sytuację bez wyjścia: albo niszczymy informację i psujemy mechanikę kwantową, albo zachowujemy informację i rujnujemy ogólną teorię względności. Obie opcje są nieakceptowalne z punktu widzenia teorii, której celem było połączenie kwantów z relatywistyką.

W ciągu czterech lat od publikacji artykuł o ścianie ognia cytowano ponad pięćset razy, ale nie osiągnięto zgody na temat tego, co z nim począć.

Temperatura gwiazdowych i supermasywnych czarnych dziur jest tak niska, że nie da się jej zmierzyć – sięga znacznie poniżej i tak już niziutkiej temperatury mikrofalowego promieniowania tła. Czarne dziury, które możemy obserwować, obecnie więcej masy zyskują, pożerając okoliczną materię, niż tracą za pośrednictwem promieniowania Hawkinga. Tym samym nie sposób wesprzeć eksperymentem którejkolwiek z prób zrozumienia parowania czarnych dziur. To problem czysto matematyczny, bez ryzyka ingerencji ze strony danych doświadczalnych.

Matematyka kontra nadzieja: studium przypadku

Szóstą i ostatnią pozycję na stworzonej przez Joego liście matematycznych poszlak przemawiających na korzyść teorii strun zajmuje wieloświat. Jednakże uznanie go za pożądany aspekt teorii strun nie przyszło mu łatwo.

Jak opowiada mi Joe, po uzyskaniu stopnia doktora usiłował wyjaśnić wartość stałej kosmologicznej – wówczas uważanej za równą zero – ale nie potrafił tego dokonać. Wtedy Steven Weinberg zaproponował, by potraktować ją jako parametr losowy,

w której to sytuacji można jedynie obliczyć, jaka jest jej najbardziej prawdopodobna wartość.

– Kiedy Weinberg wyszedł z tym rozumowaniem, zaprotestowałem – mówi mi Joe. – Chciałem wyznaczyć tę stałą; nie chciałem, żeby była liczbą losową.

Weinberg nie napisał, gdzie realizują się te wszystkie losowe wartości stałej kosmologicznej; założył po prostu, że musi istnieć duża liczba wszechświatów. Wówczas była to raczej mglista idea. To się jednak miało zmienić, a Joe miał w tym swój udział. Wspomina:

– Wspólnie z [Raphaelem] Bousso wykazaliśmy, ku mojej wielkiej rozpaczy, że teoria strun wydaje się dostarczać dokładnie takiego prawa na poziomie mikro, jakiego Weinberg potrzebował.

Matematyka ujawniła kolejne powiązanie, tym razem nie tylko niespodziewane, ale i niepożądane.

– Usiłowałem podważyć ten rezultat, ale bezskutecznie – mówi Joe. – Nawet kiedy inni zaczęli go studiować i rozwijać, ja chciałem go obalić. Musiałem z tego powodu dosłownie iść do psychiatry. Tak mnie to przybiło. Odbierałem to tak, jakby właśnie ginęła jedna z naszych ostatnich przesłanek co do podstawowego charakteru fizyki fundamentalnej, ponieważ rzeczy, które mieliśmy nadzieję obliczyć, stawały się przypadkowe.

Stałą kosmologiczną zmierzono, a przewidywanie Weinberga okazało się trafne. Wieloświat zademonstrował swoją użyteczność.

Joe wspomina:

– Sean Carroll przypomniał mi kilka lat później, jak to po pomiarze stałej kosmologicznej obiecałem mu swoje biuro, bo przeczuwałem rychły koniec fizyki. Przez długie lata trwałem w przekonaniu, że nasza droga naprzód została w dużej części zablokowana. Mówiąc szczerze – dodaje – mam sporą tendencję do niepokoju, która niekiedy skutecznie utrudnia mi życie. Ale

wieloświat doprowadził mnie do punktu, w którym uznałem, że powinienem wybrać się do lekarza. Tak było, wylądowałem u psychiatry z powodu wieloświata – mówi ze śmiechem.

Stopniowo Joe zaakceptował nową sytuację. Dzisiaj fakt, iż teoria strun dostarcza całego krajobrazu rozwiązań umożliwiającego formułowanie przewidywań probabilistycznych, poczytuje za jej zaletę.

– Wracając do naukowego wątku tej historii i wycinając z niego ten fragment, gdy koniecznie chciałem, żeby coś było prawdą – kontynuuje Joe – muszę przyznać, iż teoria strun dostarczyła Weinbergowi brakującego fragmentu układanki.

∞∞

Moim zdaniem opowieść Joego ujawnia trudność, o której naukowcy rzadko wspominają: zaakceptowanie prawdy bywa trudne, zwłaszcza brzydkiej prawdy.

Odkrywanie piękna i sensu w naturalnym porządku rzeczy to typowo ludzkie pragnienie i naukowcy wcale nie są na nie odporni. Psycholog Irvin Yalom wyodrębnił bezsensowność jako jeden z czterech lęków egzystencjalnych, których usiłujemy za wszelką cenę unikać[14]. W istocie wiele mankamentów poznawczych, takich jak nasza skłonność do myślenia życzeniowego (które psychologowie wolą nazywać „poznaniem motywowanym”), jest po to, by chronić nas przed brutalną rzeczywistością.

Naukowiec musi jednak porzucić pocieszające ułudy. Nie zawsze jest to łatwe. Konsekwencje ujawniane przez równania mogą rozmijać się z oczekiwaniami ich autora – który może zapłacić za to wysoką cenę.

Joe to jeden z najbardziej uczciwych intelektualnie ludzi, jakich znam, zawsze gotów, by podążyć za logicznym rozumowaniem

niezależnie od tego, czy podoba mu się miejsce, w które go prowadzi – o czym dobitnie świadczą przykłady ściany ognia wokół czarnej dziury oraz wieloświata. To czyni go wyjątkowo przenikliwym myślicielem, mimo iż niekiedy ani trochę nie przepada za wnioskami narzuconymi logiką wywodu. I właśnie to jest powód stosowania matematyki w fizyce teoretycznej: jeśli używamy jej poprawnie, otrzymywane wnioski są niepodważalne.

Ale fizyka nie jest matematyką. Nawet najlepsza logiczna dedukcja opiera się na początkowych założeniach. W przypadku teorii strun są to, między innymi, symetrie szczególnej teorii względności oraz procedura kwantyzacji. Samych tych założeń nie da się udowodnić. Koniec końców jedynie eksperyment może zdecydować, która teoria fizyczna jest poprawna.

∞∞

Joe dotarł do końca swoich notatek. Mówi, że jego zdaniem największym problemem, z którym obecnie mierzy się teoria strun, są ściany ognia wokół czarnych dziur. Jak wyjaśnia, wynik ten „nauczył nas, że wcale nie wiemy tak dużo, jak nam się wydawało".

– Jak daleko twoim zdaniem udało nam się zajść na drodze do teorii wszystkiego? – pytam.

– Nie cierpię zwrotu „teoria wszystkiego", bo „wszystko" jest po prostu źle zdefiniowane i zarozumiałe – zauważa na wstępie Joe. Następnie podejmuje: – Uważam, że teoria strun jest niekompletna. Potrzebuje nowych idei. Te mogą nadejść z pętlowej grawitacji kwantowej. Jeśli faktycznie tak się stanie, jeśli te kierunki badawcze ulegną scaleniu, to może być to, czego potrzebujemy. Ale teoria strun święciła takie triumfy, że ludzie, którzy popchną fizykę do przodu, z pewnością będą czerpać z jej idei.

Dyskomfort w teorii strun

Powieść Stephena Kinga z 1987 roku pod tytułem *Stukostrachy* rozpoczyna się w lesie, w którym niejaka Roberta potyka się o częściowo zakopany kawałek metalu. Próbuje wyciągnąć go z ziemi, ale bezskutecznie, więc zaczyna kopać. Wkrótce dołączają do niej inni, z fanatycznym uporem usiłujący wydobyć na powierzchnię, cokolwiek się pod nią kryje – ogromny obiekt niewiadomego przeznaczenia, rozciągający się daleko w głąb ziemi. Odsłaniając coraz więcej, kopacze zaczynają podupadać na zdrowiu, ale za to nabywają paru nowych umiejętności, w tym telepatii i nadludzkiej inteligencji. Obiekt okazuje się pozaziemskim statkiem kosmicznym. Niektórzy giną. Kurtyna.

Stukostrachy to zdaniem samego Kinga „fatalna książka”[15]. Pewnie ma w tym sporo racji, niemniej jednak dzieło to stanowi świetną metaforę teorii strun. Oto mamy obco wyglądający obiekt nieznanego przeznaczenia, zakopany głęboko w matematyce, a także coraz bardziej fanatyczny tłum ludzi o ponadprzeciętnej inteligencji, usiłujących zrozumieć, czym właściwie jest.

Uczeni wciąż bowiem tego nie wiedzą. Nawet najlepszy przyjaciel teoretyków strun, John Conlon, określił ją tajemniczo jako „spójną strukturę czegoś” (*a consistent structure of something*)[16]. Z kolei Daniele Amati, jeden z pionierów tej dziedziny, wyraził opinię, jakoby „teoria strun była fragmentem fizyki XXI wieku, który przypadkiem znalazł się w wieku XX”[17]. Wiem, w XX wieku pewnie brzmiało to bardziej przekonująco.

Jednakże przy całej kontrowersji otaczającej teorię strun w sferze publicznej społeczność fizyków raczej nie wątpi w jej użyteczność. W przeciwieństwie do teorii wirów matematyka teorii strun jest głęboko zakorzeniona w działach fizyki, które ewidentnie opisują naturę: w kwantowej teorii pola i ogólnej teorii względności. Mamy więc pewność, że istnieje łącznik teorii strun z prawdziwym światem. Wiemy także, że można jej użyć do

lepszego zrozumienia kwantowej teorii pola. Wciąż jednak nie wiemy, czy teoria strun rzeczywiście jest poszukiwaną teorią grawitacji kwantowej, unifikującą oddziaływania modelu standardowego.

Jej zwolennicy lubią wskazywać, że skoro jest ona *jakąś* teorią kwantowej grawitacji i łączy się z teoriami cieszącymi się słusznym uznaniem, to nadzieja, iż stanowi ona *tę właściwą* teorię grawitacji, wydaje się rozsądna. Nie mogą uwierzyć, że natura nie zdecydowałaby się na urzeczywistnienie tak wielkiej i eleganckiej struktury matematycznej.

Przykładowo, powszechnie używany podręcznik teorii strun autorstwa Larsa Brinka i Marca Henneaux zaczyna się od słów: „Niemal nieodparte piękno teorii strun uwiodło w ostatnich latach wielu fizyków teoretyków. Nawet zahartowani badacze dali się porwać zarówno temu, co już zobaczyli, jak i obietnicy czegoś więcej”[18]. Natomiast John Schwarz, jeden z twórców tej teorii, mawiał: „Struktura matematyczna teorii strun jest tak piękna i ma tyle cudownych własności, że musi wskazywać na coś głębokiego”[19].

Z drugiej strony, matematyka pełna jest niesamowitych i pięknych tworów, z których większość nie opisuje świata. Mogłabym roztrząsać do samego końca wiecznej inflacji, jak niefortunnie zrządził los, iż nie zamieszkujemy sześciowymiarowej rozmaitości zespolonej, albowiem w tego typu przestrzeniach rachunek różniczkowy jest znacznie elegantszy niż w przestrzeni rzeczywistej, w której przyszło nam żyć, ale niczego by to nie zmieniło. Natury to nie obchodzi. Poza tym nie tylko nikt nie udowodnił, że teoria strun wynika jednoznacznie z teorii względności i modelu standardowego, lecz taki dowód nie jest możliwy, gdyż – zapraszam do refrenu – twierdzenia są tylko tak silne, jak ich założenia.

Prawdziwości założeń nigdy nie udowodnimy. W konsekwencji teoria strun nie jest jedynym możliwym podejściem ani do grawitacji kwantowej, ani do unifikacji; inne ujęcia wychodzą po prostu z odmiennych założeń, tak jak czyni to teoria E_8 Garretta Lisiego, która startuje z przesłanki, iż przyroda powinna być naturalna w sensie geometrycznym. Niemniej oprócz teorii strun tylko kilka podejść do grawitacji kwantowej przerodziło się w znaczące programy badawcze.

W obecnej chwili najpoważniejszą konkurentką teorii strun jest pętlowa grawitacja kwantowa (*loop quantum gravity*). W celu uniknięcia problemów pojawiających się w trakcie prób kwantowania grawitacji teoria ta wprowadza nowe zmienne dynamiczne, takie jak małe pętle w czasoprzestrzeni (stąd nazwa), poddając je następnie kwantyzacji. Zwolennicy pętlowej grawitacji uważają za istotniejsze, by od samego początku respektować zasady ogólnej teorii względności, niż unifikować oddziaływania modelu standardowego. Teoretycy strun stoją na przeciwnym stanowisku – są zdania, że wymóg unifikacji wszystkich sił dostarcza dodatkowych wskazówek.

Bodaj najbardziej konserwatywnym rozszerzeniem ugruntowanych teorii, jakim obecnie dysponujemy, jest tak zwana grawitacja asymptotycznie bezpieczna (*asymptotically safe gravity*). Badacze reprezentujący tę dziedzinę argumentują, że nie ma żadnego problemu z kwantyzacją grawitacji i błędem jest myśleć inaczej. Twierdzą, iż jeśli przyjrzeć się bliżej, zwyczajna procedura kwantowania działa zupełnie dobrze. Omawiana teoria pozwala uniknąć standardowych kłopotów związanych z tą procedurą poprzez założenie, że grawitacja staje się słabsza w wysokich energiach.

Z kolei przyczynowa dynamiczna triangulacja (*causal dynamical triangulation*) podchodzi do problemu, w pierwszej kolejności przybliżając czasoprzestrzeń za pomocą trójkątnych kształtów

(stąd nazwa), a następnie ją kwantuje. W ostatnich latach poczyniono w tej dziedzinie spore postępy, zwłaszcza gdy mowa o opisie geometrii wczesnego wszechświata.

Istnieje kilka dalszych podejść do grawitacji kwantowej, ale te wymienione powyżej są dziś najpopularniejsze[20]. Prawie wszystkie próby skwantowania grawitacji zakładają obecnie, że symetrie odkryte w modelu standardowym i teorii względności stanowią integralną część głębszej struktury. Można natomiast przyjąć całkowicie odmienną perspektywę, w której obserwowane symetrie jako takie nie są fundamentalne, lecz emergentne.

Piękno emergentne

Xiao-Gang Wen jest profesorem fizyki materii skondensowanej w MIT (Massachusetts Institute of Technology). Jego dziedzina zajmuje się układami składającymi się z wielu cząstek, które działają wspólnie – ciałami stałymi, cieczami, nadprzewodnikami i tak dalej. Mówiąc językiem rozdziału 3, fizyka materii skondensowanej używa teorii efektywnych, słusznych tylko w niskiej rozdzielczości lub niskiej energii – nie zalicza się więc do podstaw fizyki. Jednak zdaniem Xiao-Ganga wszechświat wraz z całą zawartością zachowuje się właśnie jak materia skondensowana.

W jego wizji przestrzeń zbudowana jest z maleńkich elementarnych jednostek, a to, co uważamy za cząstki modelu standardowego, to tylko kolektywne formy ruchu tych jednostek, nazywane „kwazicząstkami". Xiao-Gang dysponuje nawet kwazicząstką zachowującą się jak grawiton, więc grawitacja też jest tu uwzględniona; uczony ten dąży do uzyskania najprawdziwszej teorii wszystkiego[21].

Elementarne jednostki we wszechświecie Xiao-Ganga to bity kwantowe lub „kubity", czyli kwantowe odpowiedniki bitów

klasycznych. Te ostatnie mogą przyjmować jeden z dwóch stanów (powiedzmy 0 i 1), natomiast kubit może znajdować się w obu stanach jednocześnie, w dowolnej możliwej kombinacji. Kubity w komputerach kwantowych konstruuje się z innych cząstek. Tymczasem w myśl teorii Xiao-Ganga są one czymś fundamentalnym. Nie są z niczego zbudowane – po prostu sobie są. Z kolei model standardowy i ogólna teoria względności wcale nie są fundamentalne, lecz emergentne, i wyłaniają się z kubitów.

Uznawszy, że jego idea będzie niezłą odtrutką na uroki teorii strun, umawiam się na rozmowę z Xiao-Gangiem.

– Tak właściwie – zagajam – to co ci się nie podoba w istniejących podejściach: w teorii strun, pętlowej grawitacji, SUSY, gdy idzie o grawitację kwantową i unifikację?

– Mam własny bardzo ścisły pomysł na teorię kwantów – mówi Xiao-Gang i zaczyna przedstawiać swoje idee.

Do opisu kubitów i tego, jak ze sobą oddziałują, wykorzystuje dużą macierz – specyficzny obiekt matematyczny zapisywany w formie tabeli – której każdy element odpowiada jednemu kubitowi. Macierz ta zmienia się wraz z upływem absolutnego czasu, co niszczy wprowadzoną przez Einsteina jedność czasu i przestrzeni.

Ani trochę mi się to nie podoba. Ale przypominam sobie, że przecież właśnie dlatego chciałam z nim porozmawiać.

– Twoja macierz jest skończona? – pytam, niezbyt wierząc, że cały wszechświat da się ująć w tabelce.

– Tak – odpowiada i dodaje, że w jego podejściu sam wszechświat jest skończony. – Jeśli przestrzeń przedstawimy jako siatkę, każdy jej punkt będzie zawierał jeden lub kilka kubitów. Twierdzimy, że odległości między punktami siatki mogą być rzędu długości Plancka. Siatka nie posiada ciągłej geometrii; wszechświat składa się tu z dyskretnych[66*] kubitów. Kwantowa

dynamika tych kubitów jest opisana macierzą, która jest skończona.

Cudnie, myślę sobie; jest jeszcze brzydziej, niż się spodziewałam.

– I po prostu zadajesz tę macierz? – pytam go.

– Tak – mówi – i sądzę, że da się z [niej] otrzymać wszystkie główne cechy modelu standardowego. Model nie jest jeszcze kompletny, ale wszystkie niezbędne składniki dają się wyprodukować z kubitów na siatce.

– A co się dzieje ze szczególną teorią względności?

– Dobre pytanie. To faktycznie powinno nas martwić.

Owszem, myślę, podczas gdy mój rozmówca tłumaczy, że szczególna wersja teorii Einsteina „jest spójna z podejściem kubitowym, choć nienaturalnie".

– Co rozumiesz przez „nienaturalnie"? – chcę wiedzieć.

Xiao-Gang wyjaśnia, że aby jego model był zgodny z relatywistyką, musi precyzyjnie dostroić jego parametry.

– Czemu tak jest, nie wiem – mówi. – Ale da się to zrobić, jeśli nalegasz.

Po dostrojeniu parametrów model kubitowy pozwala w przybliżeniu odtworzyć szczególną teorię względności, a przynajmniej tak twierdzi Xiao-Gang.

– A czy symetrie cechowania wyłaniają się w niskich energiach? – dopytuję, chcąc się upewnić.

– Tak – potwierdza. – Choć fundamentalna teoria przyrody może nie mieć żadnej symetrii – tłumaczy Xiao-Gang – model kubitowy nawet bez nich pozwala uzyskać symetrię cechowania w niskich energiach.

Co więcej, mój rozmówca twierdzi, iż wraz ze swoimi współpracownikami znalazł pewne przesłanki, że ich model może

również przybliżać ogólną teorię względności, aczkolwiek za wcześnie na wyciąganie definitywnych wniosków.

Jestem sceptyczna, ale może to tylko nieuzasadnione uprzedzenia. Czy to nie coś, czego szukałam? Coś znajdującego się daleko od utartych ścieżek? Czy naprawdę dziwniejsza jest wiara, że wszystko składa się z kubitów, aniżeli ze strun, pętli albo jakiejś 248-wymiarowej reprezentacji gigantycznej algebry Liego?

Dla kogoś, kto kontakt z fizyką miał ostatnio w liceum, musi to zakrawać na kompletny absurd, że ludziom płaci się za takie pomysły. Z drugiej strony, ludziom płaci się też za wrzucanie piłek do obręczy.

– Jaki był odbiór twojej pracy? – pytam.

– Niezbyt dobry – odpowiada Xiao-Gang. – Ludzi zajmujących się fizyką wysokich energii niespecjalnie obchodzi to, co staramy się osiągnąć. Pytają: „Po co?", bo ich zdaniem model standardowy w połączeniu z rachunkiem zaburzeń zupełnie wystarczą i nie ma sensu poza nie wykraczać.

Nagle dociera do mnie, co jest celem Xiao-Ganga. Wcale nie chodzi o unifikację. On chce uporządkować nieelegancką matematykę modelu standardowego.

∞∞

Jeśli czytelnik odniósł wrażenie, że dobrze rozumiemy teorie, którymi się posługujemy, to przykro mi, ale nie. W rzeczywistości nie potrafimy rozwiązać równań modelu standardowego, więc zamiast tego znajdujemy rozwiązania przybliżone, posługując się tak zwanym rachunkiem zaburzeń.

Zaczynamy od tego, że rozważamy cząstki, które nie oddziałują w ogóle, i patrzymy, jak wygląda ich swobodny ruch. Następnie pozwalamy im wpadać na siebie, ale tylko delikatnie, tak by nie schodziły zanadto ze swoich trajektorii. Potem sukcesywnie

dokonujemy dalszych poprawek, uwzględniających coraz większą liczbę delikatnych zderzeń, aż osiągniemy zamierzoną dokładność obliczeń. Przypomina to rysowanie wstępnego szkicu, po którym następuje stopniowe dodawanie kolejnych szczegółów.

Ta metoda działa jednak tylko wtedy, gdy oddziaływanie między cząstkami nie jest zbyt silne – gdy zderzenia nie są przesadnie brutalne – w przeciwnym razie bowiem poprawki nie stają się coraz mniejsze (albo wręcz nie zasługują na miano poprawek). Z tego powodu trudno na przykład obliczyć, w jaki sposób kwarki łączą się w jądra atomowe, ponieważ w niskich energiach oddziaływanie silne jest faktycznie silne, przez co kolejne poprawki nie maleją. Na szczęście oddziaływanie to słabnie w wyższych energiach, dzięki czemu obliczenia dla zderzeń w LHC są stosunkowo łatwe.

Mimo iż w pewnych przypadkach rachunek zaburzeń się sprawdza, wiemy, że od strony matematycznej w końcu zawodzi, albowiem od pewnego momentu poprawki przestają maleć. Metoda, która dostarcza poprawnych przewidywań, w zupełności wystarczy pragmatycznemu fizykowi, bez względu na to, czy matematycy potrafią się zgodzić, dlaczego właściwie działa. Jednak jak zauważa Xiao-Gang, zasadniczo nie rozumiemy tej teorii. Może to być kwestia braku odpowiedniej matematyki, ale może to też wskazywać na głębszy problem[22].

Xiao-Gang Wen uważa, że problemowi temu nie poświęca się uwagi, na jaką zasługuje, a w konsekwencji nie ma eksperymentów, które mogłyby pomóc go rozwiązać.

– Potrzebujemy nowych eksperymentów, które zmuszą ludzi do zmierzenia się z tą kwestią – mówi, po czym sugeruje, że należałoby badać zachowanie się materii we wczesnym wszechświecie w sytuacjach, gdy standardowe przybliżenia są bezsilne.

Ma rację. Przykro mi, że źle osądziłam jego pomysł. Zupełnie zapomniałam o tych dobrze znanych problemach. Nikt nigdy o nich nie wspomina.

– Gdy próbuję napisać artykuł dla ludzi od grawitacji kwantowej i fizyków wysokich energii, komunikacja jest bardzo utrudniona, mimo że sam wywodzę się z tej drugiej dziedziny – mówi Xiao-Gang. – Podstawowy punkt widzenia i wyjściowe założenia są tu zupełnie inne. Z naszej perspektywy punkt wyjścia to po prostu zbiorowisko zwykłych kubitów. Prowadzi to jednak do symetrii cechowania, [fermionów] i tak dalej. A piękno jest emergentne. Nie jest to popularne. Nie jest to *mainstream*.

W skrócie

- Wymóg spójności dostarcza niekiedy potężnych wskazówek w poszukiwaniach nowych praw przyrody. Nie jest to kwestia estetyki.
- Nawet jednak problemy ze spójnością dają się rozwiązać wyłącznie przy użyciu matematyki, bez pomocy eksperymentu, albowiem samo sformułowanie problemu zależy od założeń uznanych wcześniej za prawdziwe.
- Wina fizyków teoretyków polega na zamiataniu trudnych pytań pod dywan i skupianiu się zamiast tego na kwestiach, które mają wyższe prawdopodobieństwo wyprodukowania publikowalnych rezultatów w krótszym czasie.
- Powodem obecnego braku postępu może być to, że koncentrujemy się na niewłaściwych kwestiach.

Rozdział 9

Wszechświat, wszystko, co istnieje, i cała reszta

W którym zachwycam się rozlicznymi sposobami wyjaśniania, dlaczego nikt nie widzi cząstek, które wymyślamy.

Prawa jak parówki

Jeśli sądzisz, czytelniku, że liczba przełomowych innowacji nigdy nie była tak wielka jak ostatnio, to masz rację. W badaniu z 2015 roku holenderscy naukowcy policzyli przymiotniki stosowane w artykułach naukowych i odkryli, że częstotliwość użycia słów „bezprecedensowy" (*unprecedented*), „przełomowy" (*groundbreaking*) i „nowatorski" (*novel*) wzrosła o 2500 procent od 1974 do 2014 roku. Na drugim miejscu uplasowały się „innowacyjny" (*innovative*), „zdumiewający" (*amazing*) oraz „obiecujący" (*promising*), ze wzrostem o ponad 1000 procent[1]. Bardzo się staramy dobrze sprzedać nasze pomysły.

Naukę nazywa się niekiedy „rynkiem idei", ale od gospodarki rynkowej różni się przede wszystkim klientelą. W świecie nauki eksperci zwracają się tylko do innych ekspertów, którzy nawzajem oceniają swoje produkty. Ostateczny werdykt opiera się na skuteczności w wyjaśnianiu obserwacji. Jednak w sytuacji braku testów eksperymentalnych najważniejszą cechą, jaką musi posiadać teoria, jest uznanie w gronie ekspertów.

To właśnie od akceptacji społeczności fizyków zależy najczęściej, czy nasze teorie zostaną kiedykolwiek przetestowane. Nie licząc garstki szczęśliwców obsypanych nagrodami

pieniężnymi, we współczesnej nauce los idei spoczywa w rękach anonimowych recenzentów wybranych spośród naszych kolegów[2]. Bez ich aprobaty trudno o zdobycie środków na badania. Niepopularna teoria, której rozwój wymaga większej ilości czasu, niż niedofinansowany badacz jest w stanie poświęcić, najpewniej nie pożyje zbyt długo.

Kolejna różnica między rynkiem dóbr konsumpcyjnych a rynkiem idei bierze się stąd, że wartość towaru jest zdeterminowana przez rynek, podczas gdy wartość wyjaśnienia naukowego wyznacza się na podstawie jej użyteczności do opisu obserwacji – tyle że jest ona często nieznana w momencie, gdy badacze muszą zdecydować, na co poświęcać czas. Świat nauki nie jest więc targowiskiem ustalającym swoje własne ceny; jest raczej platformą prognostyczną do szacowania przyszłych cen narzucanych z zewnątrz. Zadaniem społeczności naukowej i jej instytucji jest typowanie najbardziej obiecujących idei i ich wspieranie. Oznacza to jednak, że marketing w nauce zaburza poprawne działanie systemu, ponieważ wypacza istotną informację. Jeśli wszystko jest przełomowe i nowatorskie, to nic takie nie jest.

Potrzeba oceny, które idee są warte rozwijania przy jednoczesnym braku wsparcia doświadczalnego, pojawiła się najpierw w podstawach fizyki, ponieważ w tej dziedzinie badań najtrudniej testować nowe hipotezy. Niemniej jest to problem, który prędzej czy później wypłynie także i w innych dyscyplinach. W miarę jak dane stają się coraz trudniejsze do zdobycia, wydłuża się czas między sformułowaniem teorii a jej doświadczalną weryfikacją. A jako że teorie są tanie i w obfitości, natomiast eksperymenty – drogie i nieliczne, w jakiś sposób musimy wybierać teorie warte przetestowania.

Nie oznacza to, że nasze opisy natury są skazane na bycie społecznym konstruktem bez związku z rzeczywistością. Owszem,

nauka jest bez wątpienia społecznym przedsięwzięciem. Jednak dopóty, dopóki prowadzimy eksperymenty, nasze hipotezy utrzymują łączność z empirią. Można się spierać, że przecież doświadczenia też są wykonywane i analizowane przez ludzi, i będzie to prawda – nauka jest „konstruowana społecznie" w tym sensie, że naukowcy są ludźmi, którzy współpracują. Jeśli jednak teoria działa, to po prostu działa, a nazywanie jej społecznym konstruktem mija się z istotą rzeczy.

Z drugiej strony oznacza to, że w sytuacji niedoboru nowych danych grozi nam zatrzymanie się na niesprawdzonych hipotezach i przestarzałych ideach. Podstawy fizyki są tu niczym kanarek w kopalni. My, teoretycy, lepiej nie siedźmy obojętnie, bo konstruktywiści społeczni tylko patrzą, żeby przystąpić do autopsji.

Kanarek nie czuje się dobrze. Wydawałoby się, że naukowcy, ze swoim zawodowym wymogiem obiektywizmu, będą bronić własnej wolności twórczej i buntować się przeciwko nakazowi zadowalania innych pod groźbą obcięcia finansowania. Nie bronią.

Uczeni godzą się na to z różnych powodów. Po pierwsze, ci, którzy nie mogą znieść tej sytuacji, odchodzą, a ci, którzy zostają, nie skarżą się – albo udało im się przekonać samych siebie, że wszystko jest w porządku[3]. Po drugie, gdy badacz zastanawia się, jak najlepiej urządzić świat nauki, odbywa się to kosztem uprawiania samej nauki i raczej nie zwiększa jego przewagi konkurencyjnej. Kilkoro znajomych w dobrej wierze próbowało mnie odwieść od pisania tej książki.

Jednakże główny powód jest taki, że naukowcy ufają nauce. Nie martwią się. „Tak działa system", stwierdzają ze wzruszeniem ramion, wmawiając sobie i każdemu, kto chce słuchać, że nie ma to znaczenia, ponieważ są przekonani, że nauka jakoś sobie poradzi. „Przecież zawsze sobie radziła", mówią. A potem głoszą ewangelię postępu odbywającego się mimochodem. Uczy ona, że

nie jest ważne, czym zajmują się badacze, bo przełomów i tak nie da się przewidzieć. Należy zatem pozwolić tym skądinąd inteligentnym ludziom robić swoje, a niebawem zdumieją nas niespodziewane efekty uboczne ich pracy. Każdy wszak słyszał, że Tim Berners-Lee wynalazł World Wide Web, chcąc pomóc fizykom cząstek dzielić się danymi.

„Wszystko ujdzie" to ciekawa idea, ale jeśli uważamy, że inteligentni ludzie pracują najlepiej, gdy swobodnie podążają za swoją ciekawością, to powinniśmy się upewnić, że faktycznie mogą za nią podążać. Bo nierobienie w tej kwestii niczego nie wystarczy.

Widzę to po swojej własnej dziedzinie badań i o tym opowiada ta książka. Ale problem nie dotyczy wyłącznie podstaw fizyki. Niemal wszyscy dzisiejsi naukowcy są uwikłani w niejawny konflikt interesów między finansowaniem a uczciwością. Nawet *tenure* nie zwalnia badacza od ciągłego publikowania dobrze cytowanych artykułów i zdobywania grantów, co w obu przypadkach wymaga nieustającej aprobaty recenzentów. Przy czym im bardziej aprobują, tym lepiej. Z kolei bycie uczciwym w kwestii mankamentów własnego programu badawczego oznacza sabotowanie swoich szans na dofinansowanie w przyszłości. W rezultacie nakłania się nas do produkowania więcej tego samego.

W tej grze znacznie lepiej radzi sobie ten, kto potrafi przekonać sam siebie, że z nauką wciąż jest dobrze. Jak widać, nie potrafiłam tego dokonać. „Prawa, podobnie jak kiełbasa, o tyle wzbudzają szacunek, o ile nie wiemy, jak się je robi", żartował John Godfrey Saxe. Miał na myśli prawa stanowione przez prawodawców, ale dziś to samo można powiedzieć o prawach przyrody.

Kopiąc w ciemności

W 1930 roku Wolfgang Pauli zapostulował istnienie nowej cząstki – neutrina – aby wytłumaczyć nierówny bilans energii w rozpadzie jądrowym. Nazwał to „desperackim środkiem zaradczym" i wyznał swojemu koledze, astronomowi Walterowi Baademu: „Zrobiłem dziś coś strasznego, czego nigdy nie powinien robić żaden fizyk teoretyk. Zasugerowałem coś, czego nigdy nie uda się zweryfikować doświadczalnie"[4]. Neutrino zaobserwowano dwadzieścia pięć lat później.

Od czasów Pauliego postulowanie istnienia cząstek przerodziło się w ulubioną rozrywkę teoretyków. Mamy preony, sfermiony, dyony, monopole magnetyczne, SIMP-y, WIMP-y, WIMPzille, aksjony, flaksjony, erebony, kornukopiony, gigantyczne magnony, maksimony, makra, branony, skyrmiony, kuskutony, plankony i neutrina sterylne – by wymienić tylko te najpopularniejsze. Mamy nawet „niecząstki" (*unparticles*). Żadnej z nich nigdy nie widzieliśmy, niemniej ich własności zostały gruntowne przestudiowane w tysiącach opublikowanych artykułów badawczych.

Pierwszą zasadą przy wymyślaniu nowej cząstki jest znalezienie dobrego powodu, dla którego nie została jeszcze wykryta. W tym celu można stwierdzić, albo że do jej wyprodukowania potrzeba zbyt wiele energii, albo że oddziałuje zbyt rzadko jak na możliwości istniejących detektorów, albo i jedno, i drugie.

Umieszczanie nowych hipotetycznych cząstek w wysokich skalach energii jest szczególnie modne wśród fizyków. Wytworzenie cząstki może wymagać ogromnej energii albo dlatego, że sama cząstka jest bardzo masywna, albo dlatego, że jest silnie związana i trzeba to wiązanie zerwać, żeby ją zobaczyć. Opcja druga, która winą za brak detekcji obarcza słabość oddziaływania, jest popularniejsza w astrofizyce, ponieważ tego

typu cząstki stanowią dobre kandydatki na ciemną materię. Zbiorczo określa się je mianem „ukrytego sektora” danej teorii.

∞∞

Wszechświat coś przed nami ukrywa. Mamy tego świadomość od 1930 roku, kiedy Fritz Zwicky zwrócił dwuipółmetrowy teleskop Hookera w kierunku gromady Coma – kilkuset galaktyk związanych swoją własną siłą grawitacji. Galaktyki te poruszają się ze średnią prędkością wyznaczoną przez całkowitą wiążącą je masę. Ku swojemu zaskoczeniu Zwicky odkrył, że ich ruch odbywa się znacznie szybciej, niż ich masa była w stanie wyjaśnić. Wywnioskował więc, że gromada zawiera dodatkową, niewidoczną materię, którą ochrzcił mianem *dunkle Materie* – ciemnej materii.

Okazało się, że to nie jedyne kuriozum w niebiosach. Gdy czterdzieści lat później Vera Rubin badała rotację galaktyk spiralnych, zauważyła, że gwiazdy znajdujące się na ich brzegu krążą po orbicie szybciej, niż oczekiwano. W każdej z ponad sześćdziesięciu przebadanych przez nią galaktyk wyglądało to tak samo. Prędkość potrzebna gwieździe do pozostania na stabilnej orbicie zależy od całkowitej masy wewnątrz tej orbity, a zatem fakt, iż zewnętrzne ramiona galaktyk wirują tak szybko, oznaczał, że muszą one zawierać więcej materii, niż jest to widoczne. Muszą zawierać ciemną materię.

W kolejnych obserwacjach zebrano coraz więcej dowodów na to, że podobne efekty są we wszechświecie powszechne. Modele fluktuacji mikrofalowego promieniowania tła pasują do danych tylko wtedy, gdy dodamy ciemną materię. Jest ona również potrzebna, by przewidywania na temat rozkładu galaktyk we wszechświecie zgadzały się z naszymi obserwacjami. Bez ciemnej materii świat po prostu nie wyglądałby tak, jak widać przez teleskopy. Kolejnego dowodu dostarcza soczewkowanie grawitacyjne, czyli ugięcie światła spowodowane zakrzywieniem

czasoprzestrzeni. Gromady galaktyk odchylają promienie światła bardziej, niż wynika to z ich widzialnej masy. Musi tam być coś jeszcze, co silnie odkształca czasoprzestrzeń.

Pierwszym nasuwającym się kandydatem na owo „coś jeszcze" są trudno dostrzegalne obiekty gwiazdopodobne, takie jak czarne dziury albo brązowe karły, których być może jest po prostu nadspodziewanie dużo w galaktykach. Gdyby jednak tak było, powinno to również dotyczyć naszej Galaktyki i powodować częste występowanie soczewkowania grawitacyjnego, a tego nie obserwujemy. Nie jest całkowicie wykluczone, iż ciemna materia składa się z ultrazwartych obiektów o masach znacznie mniejszych od typowej gwiazdy, które nie powodowałyby zauważalnego soczewkowania. Jednakże w takim scenariuszu nie jest jasne, jak tego typu obiekty miałyby w ogóle powstać. Dlatego wśród fizyków większą popularnością cieszy się obecnie inny rodzaj ciemnej materii.

Mianowicie wyjaśnienie, które wzbudziło najwięcej zainteresowania, głosi, iż ciemna materia składa się z cząstek gromadzących się w gigantyczne obłoki, które tworzą niemal idealnie sferyczne halo wokół widzialnych dysków materii galaktycznej. Prawie wszystkie znane nam cząstki oddziałują jednak zbyt silnie, by móc uformować tego typu halo. Wyjątkiem są neutrina, ale są one zbyt lekkie, poruszają się za szybko i nie tworzą wystarczających zagęszczeń. A zatem czymkolwiek jest ciemna materia, musi być zbudowana z czegoś nowego.

∞∞

Drugą zasadą przy wymyślaniu nowej cząstki jest podanie argumentu, dlaczego niebawem zostanie odkryta, bo w przeciwnym razie nikt się nią nie przejmie. Nie musi to być dobry argument – i tak każdy chce w to wierzyć – ale trzeba zaproponować publice wyjaśnienie, które będzie mogła potem

powtarzać. Utarty sposób polega na znalezieniu numerycznych koincydencji i zasugerowaniu, że wskazują one na nową fizykę w jakimś planowanym eksperymencie. Warto przy tym stosować takie zwroty jak „naturalne wyjaśnienie" lub „sugestywny związek". Jeśli nasz pomysł nie prowadzi do tego typu koincydencji, nie szkodzi – po prostu wpadamy na kolejny. Z czysto statystycznych powodów w końcu się uda.

Szczególnie szczęśliwym numerycznym zbiegiem okoliczności, który zainspirował wiele badań w astrofizyce, jest tak zwany cud WIMP. WIMP to skrót od *weakly interacting massive particle*, czyli „słabo oddziałująca cząstka masywna". Cząstki tego typu dostarczają obecnie najpopularniejszych kandydatek na składniki ciemnej materii, przy czym nie bez znaczenia jest to, iż da się je łatwo pożenić z teoriami supersymetrycznymi. Na podstawie ich mas i stopnia oddziaływania możemy szacować, jak wiele WIMP-ów powinno było powstać we wczesnym wszechświecie. W wyniku daje to mniej więcej poprawną zawartość ciemnej materii leżącą w pobliżu zmierzonej wartości 23 procent. Ta przybliżona równość to właśnie ów cud WIMP.

Według astrofizyczki Katherine Freese cud WIMP to „główny powód, dla którego WIMP-y są tak poważnymi kandydatami na ciemną materię"[5]. Równie znany badacz w tej dziedzinie Jonathan Feng uważa tę zbieżność liczb za „szczególnie obiecującą", a inni zgadzają się, że była to „główna motywacja teoretyczna w tej tematyce przez wiele lat"[6]. Była również motywacją dla eksperymentów.

Ponieważ znamy całkowitą masę ciemnej materii w Drodze Mlecznej, możemy oszacować, ile jej cząstek o pewnej wybranej masie przenika nas w każdej chwili. To ogromna liczba: jeśli masa typowego WIMP-a wynosi 100 GeV, przez samą twoją dłoń przechodzi co sekundę około 10 milionów tych cząstek. Oddziałują jednak bardzo rzadko: optymistyczne oszacowania mówią

o jednym oddziaływaniu WIMP-a w jednym kilogramie substancji czynnej detektora na rok[7].

Ale „rzadko” nie oznacza „nigdy”. Możemy znaleźć dowody na rzecz istnienia WIMP-ów przez dokładne monitorowanie znacznej ilości substancji zabezpieczonej przed wszystkimi innymi oddziaływaniami. Co jakiś czas cząstka ciemnej materii zderzałaby się z atomem naszej substancji, pozostawiając po sobie niewielką ilość energii. Doświadczalnicy obecnie poszukują trzech możliwych śladów tej energii: jonizacji (elektron mógł zostać oderwany od atomu, pozostawiając dodatnio naładowany jon), scyntylacji (atom mógł ulec wzbudzeniu, a powracając do stanu podstawowego, wyemitował błysk światła) i fononów (energia zmieniła się w ciepło lub drgania). Tego typu czułe eksperymenty często umieszcza się głęboko pod ziemią, gdzie większość cząstek promieniowania kosmicznego jest odfiltrowanych przez otaczające skały.

Możliwość poszukiwania rzadkich oddziaływań z ciemną materią została po raz pierwszy zasugerowana przez Marka Goodmana i Edwarda Wittena w 1985 roku[8]. Samo poszukiwanie cząstek ciemnej materii zaczęło się niejako mimochodem: doświadczalnicy pracujący przy detektorze zaprojektowanym do łapania neutrin w 1986 roku donieśli o pierwszych „interesujących ograniczeniach nakładanych na galaktyczną zimną ciemną materię oraz na lekkie bozony emitowane ze Słońca”[9]. Raportowanie o „interesujących ograniczeniach” w prostym języku oznacza tyle, że nic nie znaleziono. Parę innych detektorów neutrin także otrzymało wówczas interesujące ograniczenia.

We wczesnych latach dziewięćdziesiątych ciemna materia dostała swój pierwszy poświęcony jej w całości eksperyment – COSME. Na fali popularności supersymetrii jeden po drugim uruchamiano nowe detektory: NaI32, BPRS, DEMOS, IGEX, DAMA i CRESST-I[10]. Otrzymały one dalsze interesujące ograniczenia.

W połowie lat dziewięćdziesiątych EDELWEISS otrzymał „najbardziej restrykcyjne ograniczenie bazujące na obserwacji zerowej”[11].

To jednak może po prostu oznaczać, że poszukiwana cząstka oddziałuje słabiej, niż się spodziewano. Zorganizowano zatem kolejne eksperymenty: ELEGANTS, CDMS, ROSEBUD, HDMS, GEDEON, GENIUS, GERDA, ANAIS, CUORE, ZEPLIN-I, XENON10 oraz XMASS. CRESST-I zmodernizowano do CRESST-II. CDMS – do SuperCDMS. ZEPLIN-I przerodził się w II, a potem w III. Wszystkie dostarczyły ciekawych ograniczeń. Dołączyły nowe detektory o większej czułości: CoGeNT, ORPHEUS, SIMPLE, PICASSO, MAJORANA, CDEX, PandaX oraz DRIFT. W 2013 roku XENON100 – zmodernizowana wersja XENON10, wyczulona na oddziaływania o 100 000-krotnie mniejszym prawdopodobieństwie wystąpienia niż pierwotnie zakładane – doniósł o „braku dowodów na sygnał ciemnej materii”[12]. Ostatnio zmodernizowano go ponownie, przemianowując na XENON1T. Kolejne detektory są w budowie.

Minęło trzydzieści lat. Ciemnej materii wciąż nie wykryto. Zakres parametrów, w których zachodzi cud WIMP, w międzyczasie wykluczono[13].

Czekając i mając nadzieję

Nauka wymaga cierpliwości, przypominam sobie i sięgam do internetu w poszukiwaniu młodzieńczego optymizmu i energii. Twitter podsuwa mi Katherine „Katie” Mack, lepiej znaną jako „Astrokatie”.

Astrokatie niedawno wspięła na szczyty twitterowej sławy, gdy jedna z jej ciętych ripost została podana dalej („retweetowana”) przez J.K. Rowling. Przeglądam jej feed. Można tam znaleźć selfie z kotem, zdjęcie z Brianem Coxem, nagranie z wywiadu

udzielonego przez nią w telewizji i wiele, bardzo wiele odpowiedzi na pytania dotyczące astrofizyki. Gdy potrzebujesz fachowej opinii na temat wody na Marsie lub najnowszych poszukiwań ciemnej materii, możesz liczyć na Astrokatie. Gdy interesują cię fakty o egzoplanecie odkrytej w zeszłym tygodniu, spytaj Astrokatie. A jeśli szukasz kogoś, by zabrał głos w kwestii seksizmu i molestowania w instytucjach naukowych, Astrokatie także ci pomoże: za pomocą Twittera zwraca uwagę na niedoreprezentowanie mniejszości i kobiet w nauce, kwestię, o której wielu naukowców woli zapominać.

Oto nowoczesna naukowczyni, myślę sobie i wysyłam jej wiadomość.

Pod jej publicznym wizerunkiem kryje się profesjonalna astrofizyczka zatrudniona na stanowisku podoktorskim na australijskim Uniwersytecie w Melbourne. Gdy rozmawiamy przez Skype'a, Katie ma na sobie kurtkę z logo NASA i wygląda jak uosobienie luzu. Pytam o jej dziedzinę badań, a ona w odpowiedzi podsumowuje ją tak:

– Zajmowałam się wieloma rzeczami, którymi ciemna materia najprawdopodobniej nie jest.

– Co czyni dany model atrakcyjnym? – pytam.

– W tematyce, w której pracuję, interesujący model to taki, który ma obserwowalne konsekwencje – mówi Katie. – Podchodzę do teorii w bardzo praktyczny sposób. Ciekawią mnie ekscytujące nowe modele, ale tylko jeśli prowadzą do sprawdzalnych przewidywań. W czasie doktoratu zajmowałam się aksjonami. Zawsze były one moim ulubionym modelem ciemnej materii, bo odgrywają ważną rolę w wielu obszarach. Wywodzą się z [teorii oddziaływań silnych], ale wpisują się też w kosmologię, a także w teorię strun. Sądzę, że z teoretycznego punktu widzenia to najatrakcyjniejsi kandydaci na ciemną materię, ponieważ nie

trzeba ich wyczarowywać znikąd; były już znane w innym kontekście i to wydaje mi się przekonujące.

∞∞

Aksjony są zaraz po WIMP-ach najpopularniejszym kandydatem na ciemną materię. Pierwotna teoria aksjonu, stworzona w celu rozwiązania problemu precyzyjnego dostrojenia silnego oddziaływania jądrowego (silny problem CP), została obalona niemal tuż po jej sformułowaniu. Zmodyfikowano ją więc tak, by aksjon mógł oddziaływać tylko bardzo słabo. Nazywany niekiedy „niewidzialnym", nowy aksjon jest trudny w detekcji, ale sprawdza się jako kandydat na ciemną materię.

Niewidzialne aksjony, jeśli istnieją, byłyby wytwarzane we wczesnym wszechświecie. Mogłyby być kreowane w stanach o bardzo niskiej energii i następnie tworzyłyby stabilny kondensat przenikający cały kosmos. To właśnie byłaby obserwowana przez nas ciemna materia. Za aksjonami nie przemawia jednak żaden „cud" i jeśli ich gęstość ma się zgadzać z danymi dotyczącymi zawartości ciemnej materii, trzeba w tym celu precyzyjnie dostroić warunki początkowe modelu[14]. Przez to aksjony są mniej atrakcyjne od WIMP-ów. Niemniej fizycy cząstek i tak je lubią, bo dzięki nim oddziaływanie silne jest ładniejsze.

Wiele z wyżej wspomnianych eksperymentów dotyczących WIMP-ów może również wykrywać aksjony i dostarczyło na ich temat interesujących ograniczeń. Jednakże w odróżnieniu od WIMP-ów aksjony sprzęgają się, jakkolwiek słabo, do pola elektromagnetycznego, dzięki czemu można je wykryć za pomocą silnych pól magnetycznych, które przekształcałyby niewielki ułamek aksjonów w fotony. Eksperyment ADMX (*Axion Dark Matter Experiment*) prowadzi poszukiwania tą metodą od 1996 roku. Z kolei eksperyment CAST (*CERN Axion Solar Telescope*), który rozpoczął zbieranie danych w roku 2003, wypatruje

aksjonów produkowanych w Słońcu, posiadających znacznie wyższe energie niż aksjony ciemnej materii. Inne eksperymenty, jak ALPS-I i ALPS-II, PVLAS oraz OSQUAR, usiłują zaobserwować proces odwrotny – zamianę fotonów w aksjony – przyglądając się zachowaniu światła w silnym polu magnetycznym. Jak dotąd w żadnym z tych eksperymentów nic nie znaleziono.

∞∞

– Niestety – mówi Katie – w swojej pracy doktorskiej nie byłam w stanie znaleźć dobrego sposobu na pozbycie się precyzyjnego dostrojenia w modelach aksjonów; gdzieś zawsze wyskakiwało. To trochę psuło zabawę. Pamiętajmy, że silny problem CP, który aksjony rozwiązują, polega na precyzyjnym dostrojeniu. Zastępując jedno dostrojenie drugim, wpadamy z deszczu pod rynnę, tyle że w nowym obszarze.

– Co jest złego w precyzyjnym dostrojeniu? – pytam moją rozmówczynię.

– Ogólnie rzecz biorąc, dostrojenie świadczy o czymś nienaturalnym w naszych teoriach. Jeśli jakiś parametr okazuje się bardzo mały, musisz założyć, że masz wielkiego farta. A to nigdy nie jest przekonujące. Raczej sugeruje, że musi istnieć jakieś inne wytłumaczenie. Jak dotąd, ilekroć mieliśmy do czynienia z precyzyjnym dostrojeniem, w końcu udawało się znaleźć wyjaśnienie, które go nie wymagało.

– Mówisz o wielkim farcie, ale jak możesz formułować stwierdzenia o prawdopodobieństwie, skoro nie dysponujesz jego rozkładem? – pytam.

– Właściwie to nie mogę. Tak po prostu podpowiada teoretykom poczucie estetyki – przyznaje Katie. – Nie podoba im się, jeśli pojawiają się małe liczby. Bardziej przemawiają do nich takie, które są bliskie 1. Nie wiem, czy istnieje jakiś nadrzędny

powód, że tak powinno być; że wszystkie stałe powinny być rzędu 1. Takie podejście do teorii po prostu się przyjęło. Nie jest to brzytwa Ockhama, bo nie czyni niczego prostszym, ale wydaje się słuszne.

– Tak się robi, fakt, ale czy powinno się tak robić?

– Skoro samo istnienie nowej cząstki opiera się na tym, że chcemy rozwiązać problem dostrojenia, to nie mamy wyjścia – mówi Katie. – Ale jako ktoś, kto nie zajmuje się tworzeniem modeli, nie muszę się aż tak nad tym zastanawiać. Mam tu nieco agnostyczne podejście. Uważam jednak, że naturalność jest przekonująca. Z mojego dotychczasowego doświadczenia z fizyką teoretyczną wynika, że kierowanie się prostotą jest dobrą zasadą, przynajmniej na początek. Przychylam się więc do obaw o naturalność. Nie będę jednak wygłaszać na ten temat mocnych stwierdzeń, bo nie potrafię i na szczęście nie muszę.

– A co z wieloświatem? – pytam.

– Nie cierpię wieloświata – odpowiada Katie. – Wiem, że to oklepane, ale serio go nie znoszę. Pewnie jest w nim jakiś rodzaj elegancji, bo dzięki niemu można po prostu przestać próbować zrozumieć wartości parametrów. Ale mnie odrzuca jego trudna weryfikowalność. Jest okropnie niechlujny, bo z jednej strony jesteśmy tu, gdzie jesteśmy, zupełnie przypadkowo, a z drugiej przywołujemy argumenty antropiczne... Nie przemawia to do mnie. Nie mam dobrego kontrargumentu, ale bardzo mi się nie podoba.

– A jakie jest twoje zdanie na temat najnowszych danych z LHC, z których, jak się wydaje, wynika konieczność precyzyjnego dostrojenia masy Higgsa?

– To nie moja dziedzina, więc nie orientuję się, z jakimi wyzwaniami i z jakimi ograniczeniami trzeba się tam mierzyć. Mogę tylko czekać i mieć nadzieję. Byłabym jednak bardzo zdziwiona, gdyby to wszystko wymagało epicykli na epicyklach,

żeby mogło działać. Mamy pewne poszlaki, że nowa fizyka jest potrzebna, a z kolei supersymetria wydaje się tracić grunt pod nogami. Ale jestem optymistką. Pewnie uda się znaleźć jakąś teorię na miejsce supersymetrii, która nie będzie tak strasznie dostrojona. Masa Higgsa – ciągnie – martwi mnie w tym sensie, że nie wiem, czego oczekiwać. Słyszałam, że według niektórych to koszmarny scenariusz. Ale nie sądzę, że zabrniemy w ślepy zaułek. Może po prostu ufam fizykom cząstek, że wyjdą z nowymi pomysłami i modelami. Nie czuję się przygnębiona; raczej podekscytowana: oto mamy przed sobą wielką tajemnicę.

Katie mówi dalej:

– Może jest tak, że nie istnieje nic piękniejszego od modelu standardowego i potem jest już tylko brzydziej, ale mam przeczucie, że znajdziemy sposób na uproszczenie nowych modeli do bardziej zunifikowanej postaci. To coś, co zawsze mnie pociągało w fizyce: ujawnianie pięknego, głębszego porządku w pozornym nieładzie.

– Czy martwi cię, że eksperymenty poszukujące ciemnej materii niczego nie znalazły? – pytam.

– Nie martwi mnie zbytnio fakt, że nie udało się jak dotąd zidentyfikować cząstki – odpowiada Katie. – Moim zdaniem udało się wzmocnić dowody na rzecz tego, że ciemna materia składa się z cząstek o określonych własnościach. Dysponujemy już tak silnymi ograniczeniami, że coraz trudniej ich szukać, co jest trochę przykre. Niemniej wszystko wskazuje na to, że mamy do czynienia z cząstkami. To wszystko robi się szalenie intrygujące. Być może martwiłabym się, że ciemna materia nie składa się z cząstek, gdyby istniał alternatywny model pasujący tak dobrze do danych.

– Z pewnością znaleźliby się ludzie twierdzący, że zmodyfikowana grawitacja dostarcza właśnie takiego modelu – napomykam.

– Nie jest zbyt przekonująca. Nie spotkałam się z niczym, co by sugerowało, że [ciemna materia w formie cząstek] nie zgadza się z danymi. Nie spotkałam się też z niczym, co sugerowałoby, że modyfikowanie grawitacji daje lepsze rezultaty. Moim zdaniem cząstki są prostsze niż wprowadzanie [nowych] pól. Gdyby zmodyfikowana grawitacja lepiej pasowała do danych, na pewno bym się zainteresowała.

∞∞∞

W celu wyjaśnienia istniejących danych kosmologicznych musimy założyć, że wszechświat zawiera dwa nowe, jak dotąd niewyjaśnione składniki. Jednym z nich jest ciemna energia. Drugi zazwyczaj przypisuje się ciemnej materii w formie cząstek – czyli „korpuskularnej" – którą można opisywać kolektywnie jako płyn. Taki sam efekt można jednak uzyskać przy założeniu, że grawitacja w zetknięciu ze zwykłą materią zachowuje się inaczej, niż wynika z naszych równań.

Okazuje się wszakże, iż modyfikowanie grawitacji jest trudniejsze od dodawania cząstek do modelu standardowego. Skutki tego pierwszego byłyby bowiem widoczne wszędzie, natomiast nowe cząstki mogłyby występować w różnych zakątkach wszechświata w odmiennych ilościach. Korpuskularna ciemna materia jest zatem bardziej elastyczną koncepcją.

Być może aż za bardzo. Astrofizycy natknęli się na regularności w świecie galaktyk, których korpuskularna ciemna materia nie potrafi wyjaśnić, takie jak „związek Tully'ego–Fishera" – empiryczna korelacja między jasnością galaktyki a prędkością jej najbardziej zewnętrznych gwiazd. Istnieją także inne problemy. Modele korpuskularnej ciemnej materii przewidują na przykład, że Droga Mleczna powinna posiadać więcej galaktyk satelitarnych, niż obserwujemy. Nie tłumaczą także, dlaczego te, które widzimy, leżą niemalże w jednej płaszczyźnie. Wreszcie jądra galaktyk nie

są odtwarzane do końca poprawnie – przy założeniu cząstkowej natury ciemnej materii gęstość zwykłej materii w centralnych obszarach galaktyk powinna być większa.

Być może powyższe mankamenty wynikają stąd, że jakieś procesy astrofizyczne nie zostały poprawnie uwzględnione w standardowym modelu kosmologicznym. Byłoby to z pewnością interesujące, ale nie zmieniłoby podstaw fizyki. Może też być tak, że korpuskularna ciemna materia nie jest dobrym wyjaśnieniem.

Pierwsza próba modyfikacji grawitacji, zwana zmodyfikowaną dynamiką newtonowską (ang. *modified Newtonian mechanics*, MOND), nie zachowywała symetrii ogólnej teorii względności, co samo w sobie mocno przemawiało na jej niekorzyść[15]. Nowsze modele zmodyfikowanej grawitacji respektują już te symetrie, wyjaśniając obserwowane regularności w galaktykach lepiej niż korpuskularna ciemna materia[16]. Za to nie radzą sobie dobrze na odległościach znacznie poniżej lub powyżej skali galaktycznej.

Rozwiązanie może leżeć gdzieś pomiędzy. Niedawno grupa badaczy postawiła hipotezę, że ciemna materia jest nadcieczą[67*], co w mniejszych skalach prowadzi do efektów przypominających zmodyfikowaną grawitację, a w większych pozwala na elastyczność właściwą korpuskularnej ciemnej materii[17]. Idea ta łączy w sobie zalety obu modeli i jednocześnie jest wolna od ich wad.

Warto wspomnieć, że pomimo różniącej się terminologii zmodyfikowana grawitacja i korpuskularna ciemna materia są niemal identyczne w warstwie matematycznej. Jak to ujęła Katie, modyfikacja grawitacji polega na dołączeniu nowych (i jak dotąd niezaobserwowanych) pól. Z kolei korpuskularna ciemna materia wymaga dorzucenia nowych (także jak dotąd niezaobserwowanych) cząstek. Ale cząstki opisuje się w języku pól, więc różnica jest minimalna. Tym, co różni oba podejścia, jest typ rozważanych pól i ich sposób oddziaływania z grawitacją.

Z punktu widzenia fizyków cząstek pola w modelach zmodyfikowanej grawitacji mają nietypowe własności. Są im słabo znane. I w ich oczach niezbyt ładne. Dlatego modele te pozostały na obrzeżach zainteresowania społeczności. Mają może kilkudziesięciu zwolenników, podczas gdy WIMP-ami i aksjonami zajmują się tysiące.

Zmodyfikowana grawitacja obecnie nie potrafi odtworzyć wszystkich danych równie dobrze jak standardowy model kosmologiczny. Powodem może być to, iż grawitacji po prostu nie trzeba poddawać modyfikacjom. Ale może też chodzić o to, że za mało ludzi pracuje nad tym, żeby odtwarzała.

∞∞

– A ty jak myślisz? – pyta Katie na koniec naszej rozmowy. – Czy według ciebie uda nam się znaleźć piękniejsze, prostsze modele?

W tym momencie zdaję sobie sprawę, że jak dotąd nikt z moich rozmówców nie spytał o moją opinię. I całe szczęście, bo nie potrafiłabym odpowiedzieć.

W trakcie moich podróży stało się dla mnie jasne, dlaczego nie potrafię znaleźć uzasadnienia kierowania się pięknem w nauce. Takie uzasadnienie po prostu nie istnieje. Jakkolwiek chcę wierzyć, że prawa przyrody są piękne, nie uważam, by nasz zmysł estetyczny był dobrym przewodnikiem. Wręcz przeciwnie – odwodzi nas od innych, pilniejszych zagadnień. Jedno z nich podał Steven Weinberg: nie mamy pojęcia, w jaki sposób wyłania się świat makroskopowy. O innym przypomniał mi Xiao-Gang Wen: nie rozumiemy kwantowej teorii pola. Wreszcie, jak pokazuje kwestia wieloświata i naturalności: nie bardzo wiemy, co to oznacza, że jakieś prawo przyrody jest „prawdopodobne”.

Odpowiadam więc Katie, że owszem, sądzę, że natura ma dla nas w zanadrzu jeszcze sporo piękna. Ale tak jak szczęścia, nie da się znaleźć piękna przez narzekanie na jego brak.

Wątłe pola i piąte oddziaływania

Jest jeszcze jeden sposób na zaproponowanie nowej fizyki i późniejsze jej ukrycie. Polega on na wprowadzeniu nowych pól, które stają się istotne albo dopiero na bardzo dużych odległościach, albo w bardzo wczesnym wszechświecie, co w obu przypadkach trudno zweryfikować. Tego typu pomysły są dziś akceptowalne, gdyż także potrafią wyjaśniać numeryczne koincydencje.

W ogólnej teorii względności stała kosmologiczna (*cosmological constant*, CC) jest parametrem swobodnym. Innymi słowy, teoria ta nie podaje żadnej głębszej zasady, na podstawie której można by ją obliczyć – jej wartość trzeba wziąć z pomiarów. Przyspieszająca ekspansja wszechświata dowodzi, iż CC jest dodatnia, a jej wartość – związana ze skalą energii porównywalną z masą najcięższego znanego neutrina. To bardzo niska skala, przynajmniej w kategoriach fizyki cząstek (por. rysunek 14)[18].

Jeśli CC jest różna od zera, to nawet czasoprzestrzeń niezawierająca żadnych cząstek nie jest już płaska. Z tego powodu stałą kosmologiczną często interpretuje się jako próżnię, która posiada niezerową gęstość energii i ciśnienie.

Jak już wspomnieliśmy, ogólna teoria względności nie mówi nam nic o wartości CC. Gęstość energii próżni możemy natomiast obliczyć w ramach kwantowej teorii pola, gdzie okazuje się nieskończona. Na szczęście pod nieobecność grawitacji nie ma to znaczenia – i tak nigdy nie mierzymy energii bezwzględnej, a co najwyżej różnicę energii. W związku z tym okazuje się, iż w modelu standardowym nieuwzględniającym grawitacji możemy,

poprzez odpowiednie procedury matematyczne, usunąć nieskończoności i otrzymać sensowny fizycznie wynik.

Jednakże w obecności grawitacji nieskończony wkład energii próżni staje się fizycznie istotny, ponieważ powinien skutkować nieskończonym zakrzywieniem czasoprzestrzeni. To, rzecz jasna, nie ma sensu. Na szczęście bliższa inspekcja ujawnia, iż energia próżni jest nieograniczona, tylko jeśli ekstrapolujemy model standardowy w obszar dowolnie wysokich energii. A ponieważ spodziewamy się, że tego typu ekstrapolacja załamuje się w energii Plancka (lub wcześniej), energia próżni musi być równa pewnej potędze energii Plancka[68*]. Tak już lepiej – przynajmniej jest skończona. Niemniej wciąż jest zbyt wielka, by dać się pogodzić z obserwacjami. Gdyby stała kosmologiczna miała taką wartość, wszechświat już dawno uległby katastroficznie szybkiej ekspansji lub zapaści.

Możemy jednak zwyczajnie dobrać wartość parametru swobodnego w ogólnej teorii względności w taki sposób, żeby po dodaniu do wkładu pochodzącego z kwantowej teorii pola (jakikolwiek by był) uzyskać wynik zgodny z empirią. Niestety taki zabieg godzi w naturalność teorii. Przypomnijmy, iż zgodnie z tym wymogiem jest czymś wysoce nieprawdopodobnym, by dwie duże liczby niemal dokładnie znosiły się wzajemnie, pozostawiając stosunkowo niewielką wartość, którą obserwujemy. Należałoby raczej oczekiwać, że otrzymana suma będzie w okolicach energii Plancka.

A zatem stała kosmologiczna nie jest naturalna, by użyć fizycznego żargonu. Wymaga precyzyjnego dostrojenia. Jej mała wartość jest nieelegancka. Nie ma w niej nic złego – po prostu nie podoba się fizykom.

Mogłoby się wydawać, że stała to najprostszy obiekt, jaki teoria może zawierać. Ponieważ jednak nienaturalność CC pociąga za sobą konieczność wyjaśnienia jej wartości, teoretycy czują się

w obowiązku wymyślić dla niej nowe prawa natury. Szlak przetarł Weinberg i jego wykorzystanie zasady antropicznej, a obecnie część społeczności pracowicie wynajduje rozkłady prawdopodobieństwa dla wieloświata. Inną dobrze znaną metodą wytłumaczenia wartości jakiejś stałej jest zastąpienie jej zmienną dynamiczną zależną od czasu. Jeśli zrobi się to umiejętnie, taka dynamiczna stała będzie samoistnie przyjmować niskie wartości, co rzekomo ma coś wyjaśniać. Tak uogólniona stała kosmologiczna nosi nazwę ciemnej energii.

Jeśli ciemna energia nie jest stała w czasie, to również przyspieszenie ekspansji wszechświata powinno nieznacznie się zmieniać. Nie istnieją dowody, by tak było. Istnieje jednak bogata literatura na temat hipotetycznych pól ciemnej energii, takich jak pola kameleonowe, pola dylatonowe, moduły, kosmony, pola fantomowe i kwintesencja. Eksperymenty już zlecono.

To nie jedyne niewidzialne pola, którymi bawią się kosmologowie. Jest jeszcze pole inflatonowe, potrzebne do rozdmuchania wczesnego wszechświata.

∞∞

Inflacja – błyskawiczne zwiększenie rozmiarów wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu – to śmiała ekstrapolacja w przeszłość, do epoki, w której gęstość materii znacznie przewyższała tę kiedykolwiek osiągniętą w eksperymentach.

Żeby teoria inflacji generowała przewidywania, trzeba najpierw określić, jak zachowuje się inflaton – pole wprowadzone właśnie po to, by wywołać inflację. W tym celu nadaje mu się energię potencjalną, która zależy od szeregu parametrów. Gdy już wybierze się potencjał, można wykorzystać inflację do obliczenia rozkładu fluktuacji gęstości we wczesnym wszechświecie. Wynik zależy od parametrów użytego potencjału i dla niektórych z najprostszych modeli pasuje on dobrze do obserwacji[19]. Modele

te poprawnie odtwarzają także inne własności mikrofalowego promieniowania tła[20].

Pojęcie inflacji pozwala więc na powiązanie obserwowanych parametrów z modelem matematycznym wczesnego wszechświata. Przewidywania modelu zależą jednak od potencjału pola inflatonowego. Moglibyśmy poprzestać na wyborze jednego potencjału, który zgadza się z bieżącymi danymi, i poprawiać go tylko w razie konieczności, ale wtedy kosmologowie by się nudzili. Dlatego pracowicie wytwarzają modele inflacyjne, dla każdego z nich obliczając przewidywania dla pomiarów, których jeszcze nie wykonano.

W pracy przeglądowej z 2014 roku naliczono 193 potencjały, przy czym mowa jedynie o tych dla pojedynczego pola inflatonowego[21]. Jednak fakt, iż teoretycy potrafią zmajstrować modele zdolne przewidzieć dowolnie wybrany rezultat przyszłych obserwacji, pokazuje jedynie, że nie są w stanie przewidzieć niczego. Ich modele są poważnie „niedookreślone", jak mówią filozofowie – nie dysponujemy wystarczającą ilością danych wejściowych, aby ich ekstrapolacja była jednoznaczna[22]. Możemy konstruować modele na podstawie dotychczasowych pomiarów, ale nie będą one w stanie przewidzieć wyników przyszłych doświadczeń.

Ten stan rzeczy skłonił Joego Silka do stwierdzenia, że „zawsze da się znaleźć modele inflacyjne, które będą wyjaśniać dowolne, modne w tym miesiącu zjawisko"[23]. Z kolei w niedawnym artykule na łamach „Scientific American" kosmologowie Anna Ijjas, Avi Loeb i Paul Steinhardt narzekają, że z powodu dużej liczby modeli „kosmologia inflacyjna w swojej obecnej postaci nie może zostać zweryfikowana metodami naukowymi"[24].

Nie chcę straszyć, ale do przebadania pozostaje jeszcze nieskończona liczba potencjałów inflatonowych. No i rzecz jasna

można też rozważać kilka typów inflatonu albo innych pól. Jest sporo miejsca na kreatywność.

Zgodnie z nieempiryczną oceną teorii mamy tu do czynienia z badaniami najwyższej jakości.

Opoka nauk

Jest środek kwietnia, Wuppertal, parę kilometrów na północ od Kolonii. Spodziewałam się hotelu lub gmachu instytutu, tymczasem adres prowadzi do domu jednorodzinnego na przedmieściach. Od frontu ścieli się mały ogródek z kwiatami. Dookoła wejścia pnie się bluszcz. Dzwonię do drzwi, które otwiera kobieta mniej więcej w moim wieku.

– Tak? – pyta.

– Cześć – mówię. – Eee... Jestem Sabine.

Tylko patrzy zdziwiona.

– Szukam George'a Ellisa? – proponuję.

Mruga raz i drugi.

– To mój ojciec. Ale on jest w Kapsztadzie.

Zaprasza mnie do środka i wykonuje telefon.

– O mój Boże! – w komórce rozlega się głos George'a przekrzykującego silnik autobusu. – Przyjechała o dwa tygodnie za wcześnie!

∞∞

Jest koniec kwietnia, Wuppertal. Ta sama ulica, ten sam dom i bluszcz. Wciskam dzwonek z nadzieją, że nie jechałam znowu cztery godziny tylko po to, żeby przestraszyć nieznajomą osobę i wrócić do domu.

Ku mojej wielkiej uldze to George otwiera drzwi.

– Witam – mówi, po czym zaprasza mnie do środka i prowadzi do skąpanej w słońcu kuchni. Ściany zdobią dziecięce rysunki.

George Ellis, profesor emerytowany na Uniwersytecie Kapsztadzkim, jest jedną z czołowych postaci kosmologii. W połowie lat siedemdziesiątych wspólnie ze Stephenem Hawkingiem napisał klasyczny już podręcznik *The Large Scale Structure of Space-Time* [Wielkoskalowa struktura czasoprzestrzeni], z którego badacze korzystają do dziś[25]. Już w 1975 roku analizował problem weryfikowalności w kosmologii, na długo zanim koncepcja wieloświata zwróciła powszechną uwagę na tę kwestię[26]. Zainteresowania George'a nie ograniczają się jednak do kosmologii. Badał również zjawisko emergencji w układach złożonych, w tym w układach chemicznych i biologicznych. Nie stroni też od filozofii. Lubi patrzeć całościowo. Ale ostatnio nie podoba mu się to, co widzi.

– Co cię martwi? – zagajam.

– Pojawili się fizycy twierdzący, że nie musimy testować ich pomysłów, ponieważ są to świetne pomysły – mówi George. Pochyla się do przodu i patrzy mi w twarz. – Proponują, jawnie bądź niejawnie, żeby osłabić wymóg doświadczalnej weryfikacji teorii. – Milknie i odchyla się z powrotem, jakby chciał się upewnić, że rozumiem powagę sytuacji. – Moim zdaniem to krok do tyłu o tysiąc lat – podejmuje. – Pisałaś o tym kiedyś i ja myślę bardzo podobnie: to podważa naturę nauki. Nie podoba mi się to z wielu powodów, z których część jest taka jak u ciebie, a część zupełnie inna. Powody, które, jak sądzę, są wspólne, mają związek z tym, że dla nauki nastały ciężkie czasy, z tymi wszystkimi sporami o szczepienia, zmiany klimatyczne, żywność GMO, energetykę jądrową, z całym tym okazywaniem sceptycyzmu wobec nauki. Fizyka teoretyczna powinna być opoką nauki, najtwardszą skałą pokazującą, że można jej całkowicie ufać. Jeśli zaczniemy tu rozluźniać wymagania, obawiam się, że

może to pociągnąć bardzo poważne skutki w pozostałych dziedzinach. Istnieją też zupełnie inne powody, dla których się tym interesuję. Takie, których zapewne nie będziesz podzielać. Chodzi o następujące kwestie: Jakie są granice nauki w stosunku do ludzkiego życia? Co leży w kompetencjach nauki, a co nie? Co może nam ona powiedzieć na temat ludzkich wartości i sensu istnienia? Uważam, że są to szalenie istotne sprawy z punktu widzenia szeroko pojętych relacji nauki i ogółu społeczeństwa.

Jak mogłabym nie podzielać takich powodów? Pozwalam mu kontynuować.

– [Jedną z ważnych] przyczyn odrzucania nauki są wypowiedzi takich naukowców jak Stephen Hawking, Lawrence Krauss i inni, jakoby nauka dowodziła nieistnienia Boga i tym podobne, czego nie jest w stanie dowieść, a które to wypowiedzi nastawiają ludzi wrogo do nauki, zwłaszcza w USA. Wyobraź sobie, że mieszkasz w środkowo-zachodnich Stanach, gdzie całe twoje życie i twoja społeczność obraca się wokół Kościoła, aż tu nagle pojawia się jakiś naukowiec i mówi: „Pozbądźcie się tego". Lepiej, żeby miał w zanadrzu solidne argumenty na poparcie swoich słów. Tymczasem David Hume już dwieście pięćdziesiąt lat temu stwierdził, że nauka nie dysponuje narzędziami pozwalającymi czy to udowodnić, czy to obalić istnienie Boga. Był to bardzo ostrożny filozof i od tego czasu nic się w tej materii nie zmieniło. Tacy naukowcy są bardzo dyletanckimi filozofami. Ale ciebie to pewnie niespecjalnie interesuje.

Filozoficzne dyletanctwo naukowców to dla mnie żadna nowość – w końcu sama do nich należę.

– Niezupełnie rozumiem – mówię – jak to się ma do oceny teorii.

– Mamy tu do czynienia z oceną teorii w takim sensie, że niektórzy uczeni stawiają przesadnie śmiałe tezy co do natury nauki: co można, a czego nie można w jej ramach dowieść –

wyjaśnia George. – Jeśli Lawrence Krauss oznajmia, iż nauka obala jakiś aspekt religii, to jest to stwierdzenie naukowe czy filozoficzne? Jeśli naukowe, jak zresztą utrzymują, to jak brzmi dowód? Jak sądzę, w tym obszarze nasze stanowiska są odmienne. Przykładowo, Victor Stenger napisał jakiś czas temu książkę, w której czytamy, iż nauka obala istnienie Boga – mówi dalej George. – Zostałem poproszony o recenzję, więc napisałem: „Otworzyłem tę książkę z wielkim zainteresowaniem, niecierpliwie pragnąc się dowiedzieć, jakiż to układ eksperymentalny dostarczył takich rezultatów, jak wyglądały punkty pomiarowe oraz czy istotność wynosiła 3 sigma, czy też może 5 sigma[69*]". – Parska śmiechem. – Oczywiście nie ma takiego eksperymentu. To są naukowcy, którzy nie rozumieją podstawowej filozofii, choćby prac Davida Hume'a czy Immanuela Kanta. To się wiąże z oceną teorii – wyjaśnia George – ponieważ nauka nie ma nic do powiedzenia w kwestiach filozoficznych, a oni twierdzą, że ma. Nauka dostarcza faktów, które mogą mieć znaczenie dla rozważań filozoficznych, ale między nią a filozofią istnieje granica, którą trzeba respektować. Spędziłem sporo czasu, zastanawiając się nad tym.

Ja podobnie, choć z innych powodów. Sądzę, że zwracanie należytej uwagi na granicę między nauką a filozofią mogłoby pomóc fizykom oddzielić fakty od wiary i przekonań. Nie widzę dużej różnicy między wiarą, że natura jest piękna, a wiarą, że Bóg jest dobry.

– Wracając do fizyki – mówię – czy niepokoi cię, dokąd zmierza?

– Tak... Na pewno słyszałaś o książce o wieloświatach autorstwa... – Usiłuje przypomnieć sobie nazwisko. – Ten teoretyk strun z Uniwersytetu Columbia, jak mu tam?

– Brian Greene?

– O właśnie. Wylicza dziewięć wieloświatów. Dziewięć! Stosuje argument równi pochyłej. Zaczynamy od Martina Reesa, według którego wszechświat nie kończy się zaraz za naszym horyzontem obserwacji, więc w tym sensie mamy wieloświat. Z tym oczywiście się zgadzam. Trochę dalej mamy chaotyczną inflację Andreia Lindego z nieskończenie wieloma wszechświatami-bąblami. Jeszcze dalej znajduje się krajobraz teorii strun, według którego poszczególne bąble rządzą się innymi prawami fizyki. Następnie docieramy do hipotezy matematycznego wszechświata [Maxa] Tegmarka. A wreszcie, hen, tam daleko znajdziemy ludzi pokroju [Nicka] Bostroma, twierdzących, iż żyjemy w komputerowej symulacji. To już nawet nie jest pseudonauka; to fantastyka.

– Zasadniczo – zauważam – to taka współczesna wersja wszechświata zegara. Dawniej mieliśmy zębatki i przekładnie, a teraz mamy komputery kwantowe.

– Otóż to – zgadza się George. – Ale widzisz, Brian Greene w swojej książce wymienia to jako jedną z możliwości. Kiedy czytam, że uczeni prezentują tego typu rzeczy jako hipotezy naukowe, zastanawiam się, na ile można wierzyć temu, co myślą. Przecież to niedorzeczne! A zatem co jeszcze z tego, co mówią, nie zasługuje na wiarę?

Nie wydaje mi się, żeby nasze stanowiska były aż tak odmienne, jak sądzi George.

– Ma to dla mnie znaczenie, ponieważ nauka wiąże się ze sporą dozą zaufania – ciągnie. – Weźmy taki LHC. Mam zaufanie do ludzi, którzy prowadzą tam eksperymenty. Albo zespół analizujący dane zebrane przez teleskop Plancka, im też ufam[70*]. Słowem, zaufanie znaczy w nauce bardzo wiele. I teraz, jeśli niektórzy rozpowiadają, jakobyśmy z dużym prawdopodobieństwem żyli w symulacji, to nie mogę im już ufać jako naukowcom, ani nawet jako filozofom.

Podczas eksperymentów LHC produkuje około miliarda zderzeń proton-proton na sekundę. To zbyt wiele danych nawet jak na możliwości obliczeniowe CERN-u. Dlatego rejestrowane „zdarzenia” (*events*) są filtrowane w czasie rzeczywistym i zachowywane jedynie wtedy, jeśli algorytm zakwalifikuje je jako interesujące. Ów „system trygerujący” spośród miliarda zdarzeń wyławia jedynie od stu do dwustu[27]. Ufamy, że doświadczalnicy wykonują swoją pracę dobrze. Musimy im ufać, bo żaden pojedynczy naukowiec nie jest w stanie sprawdzić każdego szczegółu pracy wszystkich pozostałych badaczy. To niewykonalne – wówczas nigdy byśmy niczego nie zrobili. Bez wzajemnego zaufania nauka nie mogłaby działać.

Sytuacja, w której okazałoby się, że CERN spędził ostatnie dziesięć lat, beztrosko kasując dane zawierające klucz do nowej fizyki fundamentalnej – moim zdaniem *to* dopiero byłby „koszmarny scenariusz”.

– Nie jestem przeciwnikiem wieloświata – mówi George. – Sprzeciwiam się tylko zaliczaniu go do ugruntowanej nauki. Ci, którzy tak robią, domagają się rozluźnienia wymogu weryfikowalności. Ścieżka rozumowania, która doprowadziła badaczy do hipotezy wieloświata, była dobra. Niemniej wychodząc z dobrze ugruntowanej fizyki, trzeba było wykonać całe mnóstwo kroków. Każdy z nich wydaje się słuszny, ale mimo wszystko stanowi niesprawdzoną ekstrapolację znanej fizyki. Kiedyś było tak, że ilekroć stawiasz jakąś hipotezę, musisz wpierw sprawdzić poprawność takiego kroku. Dopiero wtedy stawiasz kolejną hipotezę i kolejny krok, który następnie weryfikujesz, i tak dalej. Bez takiej częstej konfrontacji z rzeczywistością możemy zawędrować daleko, ale za to całkowicie błędną ścieżką.

– Ale to dlatego, że doświadczalne testy są obecnie bardzo trudne – mówię. – Co w takiej sytuacji mamy robić, żeby nie stać w miejscu?

– Myślę, że powinniśmy się cofnąć i zacząć od podstawowych zasad – odpowiada George. – Przede wszystkim musimy ponownie przemyśleć podstawy mechaniki kwantowej, albowiem wszystko zasadza się na problemie pomiaru. Kiedy tak naprawdę ma miejsce pomiar? Wtedy, kiedy dajmy na to foton jest emitowany lub absorbowany. Jak to opisać? Za pomocą kwantowej teorii pola. Jednak otwierając dowolny podręcznik tej teorii, nie znajdziemy niczego na temat problemu pomiaru.

Kiwam głową:

– Podaje się sposób obliczania prawdopodobieństw, ale nigdy nie omawia się mechanizmu przejścia od prawdopodobieństwa do wyniku pomiaru.

– Otóż to. Musimy więc od nowa zastanowić się nad kwestią pomiaru.

Kolejną zasadą zalecaną przez George'a jest nieposługiwanie się nieskończonościami.

– Ilekroć uczeni mówią o nieskończonościach, wyskakują najróżniejsze paradoksy – mówi George. – Pisałem o tym już w latach siedemdziesiątych[28]. Zwróciłem wtedy uwagę na fakt, iż nić DNA składa się ze skończonej liczby nukleotydów, a zatem jeśli prawdopodobieństwo zaistnienia życia jest niezerowe, to we wszechświecie o wystarczająco dużej objętości każda możliwa kombinacja kodu genetycznego zostanie w końcu wykorzystana i zacznie się powtarzać. Innymi słowy, jeśli wszechświat jest nieskończony, to jeśli tylko szanse pojawienia są życia są niezerowe, będzie go zamieszkiwać nieskończenie wielu genetycznie tożsamych bliźniaków. Nieco ogólniej, w nieskończonym wszechświecie wszystko, co tylko możliwe, wydarzy się nieskończenie wiele razy. Kwestia nieskończoności to jeden z moich koników – ciągnie. – O jej niefizycznej naturze pisał już Hilbert w 1925 roku[29]. Stwierdził, że nieskończoność jest potrzebna dla kompletności matematyki, ale nie pojawia się

nigdzie w fizycznym świecie. Dzisiejsi fizycy zdają się myśleć, że mogą traktować nieskończoność po prostu jak jakąś bardzo wielką liczbę. Tymczasem jest ona ze swej natury czymś zupełnie innym. Niezależnie od tego, co byśmy robili i jak długo czekali, nie da się jej zrealizować; jest zawsze poza zasięgiem.

I konkluduje:

– Dlatego uważam, że powinniśmy przyjąć za podstawową, filozoficzną zasadę, iż nic fizycznie rzeczywistego nie może być nieskończone. Nie ma sposobu, by to udowodnić; może to być prawda lub nie. Ale powinniśmy to przyjąć jako zasadę.

– Chwileczkę – mówię. – Przecież w innych działach fizyki stosuje się taką zasadę.

– Naprawdę?

– Tak. Kiedy w jakiejś funkcji pojawia się wartość nieskończona, zakładamy, że jest niefizyczna – wyjaśniam. – Natomiast nie istnieje dobry powód *matematyczny*, by teoria nie zawierała nieskończoności. To wymóg natury filozoficznej, który przerodził się w założenie matematyczne. Mówi się o nim, ale nigdy się go nie zapisuje. Dlatego mówię, że został zagubiony w matematyce. W naszych teoriach znajduje się wiele takich założeń o charakterze filozoficznym, na które nie zwracamy uwagi.

– Racja – zgadza się George. – Problem polega na tym, że fizycy zniechęcili się do filozofii z powodu pewnego odłamu filozofów, którzy plotą kompletne bzdury: słynna sprawa Sokala i tak dalej[71*]. Faktycznie *są* tacy filozofowie, którzy z naukowego punktu widzenia wygadują głupoty. Niemniej uprawiając fizykę, nie da się nie przyjmować jakichś założeń natury filozoficznej. Istnieje zresztą wielu porządnych filozofów, jak Jeremy Butterfield, Tim Maudlin albo David Albert, którzy są bardzo rozsądni, gdy chodzi o związek nauki z filozofią. Pomagają oni dostrzec, gdzie leżą podstawy i w jaki sposób najlepiej ujmować pytania.

Komu potrzebna filozofia?

W 1996 roku profesor fizyki Alan Sokal spreparował bezsensowny artykuł, zatytułowany *Transgresja granic: ku transformatywnej hermeneutyce kwantowej grawitacji* (*Transgressing the Boundaries: Towards a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity*), który następnie wysłał do czasopisma naukowego, gdzie przyjęto go do publikacji. Fakt, iż redakcja czasopisma oraz powołani przez nią recenzenci[72*] nie byli w stanie rozpoznać oczywistych bzdur, wywołał traumę u filozofów, a u fizyków wzmocnił przekonanie o własnej wyższości.

Prowokacja Sokala stanowi jeden z powodów, dla których między filozofami a fizykami, zwłaszcza tymi zajmującymi się kwestiami fundamentalnymi, panują dziś trudne relacje. Znam wielu fizyków, którzy używają słowa „filozofia" w charakterze zniewagi, a nawet ci, którzy sympatyzują z dążeniami filozofów, wątpią w przydatność jej metod.

Jest to poniekąd zrozumiałe. Słyszałam o myślicielach odkrywających na nowo argumenty, które fizycy już dawno obalili. Słyszałam, że niektórych z nich niepokoją paradoksy, które w fizyce rozwiązano wieki temu. Słyszałam wreszcie, że są tacy, którzy samodzielnie wywodzą prawa przyrody, zupełnie ignorując ustalenia nauki na tym polu. Krótko mówiąc, istnieje niestety wielu filozofów, którzy nie zauważają, kiedy wykraczają poza swoje kompetencje.

To samo można jednak powiedzieć o fizykach i nie zdziwiłabym się, gdyby skrytykował mnie zaraz jakiś filozof. Fizycy korzystają z argumentów natury filozoficznej częściej, niż chcieliby przyznać, i sama z pewnością nie jestem wyjątkiem. Niemniej bardzo łatwo przychodzi nam zbyć filozofię jako bezużyteczną.

Naukowcy w swojej pracy są bardzo skupieni na celu. Zdobywanie nowej wiedzy interesuje ich, tylko jeśli jest szansa, że posunie naprzód ich badania. Tymczasem nie spotkałam jeszcze

filozofa, który wpadłby na coś, co mogłoby się przydać fizykowi. Nawet ci myśliciele, którzy znają się na fizyce, wydają się zadowalać analizowaniem lub krytykowaniem tego, co robimy. Nie mają w planach bycia przydatnymi.

O ile wiem, moje doświadczenie jest tu dosyć typowe. Mogę się podpisać pod następującym podsumowaniem Lawrence'a Kraussa: „Jako praktykujący fizyk [...] zarówno ja sam, jak i większość moich kolegów, z którymi o tym dyskutowałem, doszliśmy do wniosku, iż filozoficzne spekulacje na temat fizyki i natury nauki nie są szczególnie użyteczne i miały niewielki lub zgoła żaden wpływ na postęp w naszej dziedzinie"[30]. Steven Weinberg w podobnym duchu stwierdził, że „wiedza filozofów nie wydaje się fizykom użyteczna"[31]. Z kolei Stephen Hawking posunął się jeszcze dalej, pisząc: „[F]ilozofia jest martwa, nie nadąża za rozwojem współczesnej nauki, zwłaszcza fizyki. To uczeni niosą obecnie znicz odkrycia w naszych poszukiwaniach wiedzy"[32].

Można odpowiedzieć tak jak Massimo Pigliucci, filozof zatrudniony w CUNY (City University of New York), który oświadczył wprost, że „zadaniem filozofii nie jest rozwijanie nauki"[33]. Cóż, skoro tak się sprawy mają, to nietrudno zrozumieć, dlaczego naukowcy nie uznają jej za przydatną.

Rzecz jasna nie powinnam przywoływać pojedynczego filozofa jako głosu całej społeczności. Ucieszyło mnie na przykład, że Tim Maudlin zgadza się, iż „fizyka potrzebuje filozofii" i że fizycy na tym skorzystają, albowiem „filozoficzny sceptycyzm pozwala skupić uwagę na słabych punktach teorii i rozumowań"[34]. Doskonale. W takim razie gdzieście się podziewali? Gdzie byliście te dwadzieścia, dziesięć lat temu, gdy pakowaliśmy się w ten bałagan?

Dzisiaj większość problemów w podstawach fizyki nie polega na napięciach z danymi doświadczalnymi, lecz ma naturę filozoficzną.

W związku z tym potrzebujemy filozofii, aby wniknęła w przyczyny naszych dolegliwości. Czy numeryczne zbiegi okoliczności są czymś, na co powinniśmy zwracać uwagę? Czy kiedykolwiek uzasadnione jest odwoływanie się do estetyki w ocenie proponowanych praw przyrody? Czy mamy powody oczekiwać, że fundamentalne prawa powinny być prostsze? Wreszcie, w sytuacji gdy badacze wysuwają setki hipotez, byle tylko publikować kolejne artykuły, jakie są właściwe kryteria oceny perspektywiczności ich pomysłów?

Filozofowie są potrzebni, by stopniowo wyprowadzać nas z przednaukowego zamieszania, zastępując je naukową argumentacją. Oznacza to, że wraz z postępem nauki i rozwojem wiedzy obszar dostępny dla filozofii w nieunikniony sposób się kurczy. Niczym dobrzy psychologowie, filozofowie nauki skutecznie czynią siebie zbędnymi. I tak jak psychologowie, nie powinni czuć się urażeni, gdy pacjent wściekle zaprzecza, jakoby potrzebował pomocy.

∞∞

– Moim zdaniem – mówię – naturalność teorii, czyli brak liczbowych koincydencji, także stanowi kryterium o charakterze filozoficznym.

– Owszem.

– Ty się zgadzasz, ale kiedy rozmawiam z przedstawicielami mojego pokolenia, w większości traktują ją jako warunek czysto matematyczny. A przecież trzeba w niej zadać rozkład prawdopodobieństwa. Skąd go wziąć? Trzeba w tym celu dysponować kolejną teorią, w której znowu będzie potrzebny rozkład prawdopodobieństwa dla rozkładów prawdopodobieństwa, i tak dalej.

– Owszem – powtarza George. – W wieloświecie możesz wybrać sobie taki rozkład prawdopodobieństwa, jaki ci się żywnie podoba, a i tak nie możesz udowodnić, że jest fizycznie rzeczywisty. [To nie jest] naukowo weryfikowalne; to teoria *ad hoc*, która ma pasować do danych.

Przez chwilę milczy, po czym dodaje:

– Myślę, że świat fizyki teoretycznej znalazł się w bardzo dziwnym miejscu.

W skrócie

- Obecna struktura świata naukowego silnie faworyzuje idee, które potrafią rozprzestrzeniać się szybko i szeroko. Dlatego powodzeniem cieszą się teorie piękne, a przy tym trudne do przetestowania.
- W dzisiejszej fizyce teoretycznej wytworzyły się ustalone praktyki tworzenia nowych praw przyrody, których to praw jeszcze przez długi czas nie będzie się dało zweryfikować.
- Kontakt z filozofią mógłby pomóc fizykom określić, które pytania są warte zadawania, jednak obecnie taki kontakt jest sporadyczny.
- Opieranie się w fizyce teoretycznej głównie na kryteriach estetycznych oraz wynikający z tego brak postępów świadczy o niezdolności tej dziedziny do samonaprawy.

Rozdział 10

Wiedza to potęga

W którym dochodzę do wniosku, że świat byłby lepszy, gdyby wszyscy mnie słuchali.

Ja, robot

To nic dziwnego, że fizycy dostrzegają piękno w prawach przyrody. Ci, dla których równania pisane na lekcjach matmy były tylko szpetnymi bazgrołami, raczej nie decydowali się później na karierę w fizyce teoretycznej. Za obserwacją, iż nie ma zbyt wielu fizyków narzekających na brzydotę praw natury, stoi dokładnie ta sama przyczyna, dla której nie ma zbyt wielu kierowców ciężarówek brzydzących się mocnymi silnikami: zazwyczaj wybieramy taki, a nie inny zawód, bo coś nas w nim ujmuje.

Poszukiwanie piękna pozostaje oczywiście naszą motywacją w codziennej pracy, „bo to daje satysfakcję z pracy i czyni ją ekscytującą", jak powiedział Gordy Kane. Albo jak to ujął Gian Francesco Giudice: „Dla mnie to właśnie ten pozaracjonalny aspekt sprawia, że fizyka jest tak ekscytująca". Jak pisze Dan Hooper w swojej książce o supersymetrii: „Najpiękniejsza teoria dałaby się zapisać prosto i krótko, być może wręcz pojedynczym równaniem. [...] Pisząc ten akapit, czuję, jak mój puls odrobinę przyspiesza, a moje dłonie zaczynają się pocić"[1].

Owszem, naukowcy też są ludźmi o pocących się dłoniach, choć społeczeństwo nie lubi na nas patrzeć w ten sposób. W niedawnej ankiecie oceniono uczonych jako bardziej „godnych zaufania" niż „przeciętna osoba", ale także jako bardziej „przypominających

roboty", „skupionych na celu" i „zimnych"[2]. Niezbyt miło. Ale nie chodzi tu o to, że takie klisze są krzywdzące – krzywdzące jest mylne utożsamianie człowieka z jego profesją. W przypadku tej ostatniej stereotyp mówi prawdę: uczeni próbują dokonać czegoś nadludzkiego. Próbujemy przekroczyć ograniczenia ludzkiego poznania i w tym celu stosujemy procedury zaprojektowane tak, by uchronić nas przed okłamywaniem innych i siebie samych.

Jednak obecnie stosowane procedury są niewystarczające. Bycie dobrym naukowcem wymaga od nas również świadomości naszych życzeń, pragnień i słabości. Musimy być świadomi naszego własnego człowieczeństwa – i korygować nasze niedociągnięcia, kiedy trzeba.

Czytelnik z pewnością słyszał historyjkę o tym, jak to wszyscy jesteśmy urodzonymi naukowcami, którzy w dzieciństwie odkrywają świat zupełnie naturalnie aż do chwili, gdy źle prowadzona edukacja stępia nasz instynkt badacza. Też ją słyszałam. Jest bardzo romantyczna, ale błędna. Owszem, mamy wrodzoną ciekawość i jako dzieci szybko uczymy się metodą prób i błędów. Ale nasze mózgi nie ewoluowały po to, by służyć nauce, lecz po to, by służyć nam. To, co dobrze przysługiwało się naszym przodkom, nie musi sprawdzać się równie dobrze w uprawianiu nauki.

Matematyka na matematyce

Fizycy to nie jedyni naukowcy goniący za pięknem. Jak na przykład wspomina James Watson, Rosalind Franklin była przekonana, że DNA ma strukturę podwójnej helisy, ponieważ struktura taka jest „zbyt ładna, by była nieprawdziwa"[3]. Biolodzy okazują się chętniej badać zwierzęta, które są miłe dla oka[4]. Z kolei David Orrell argumentuje, że klimatolodzy faworyzują modele odznaczające się elegancją ze szkodą dla dokładności[5].

Nie chcę powiedzieć, że pogoń za pięknem stanowi tu teorię wszystkiego. Jeśli nie ma błędu poznawczego polegającego na próbach łapania zbyt wielu srok za ogon, to powinno się go wprowadzić, a ja nie chcę paść jego ofiarą. Dostrzegłam przesadne uleganie względom estetycznym jedynie w kilku dziedzinach nauki i nawet w fizyce jest ono dominujące głównie w obszarach, o których pisałam powyżej. Zanim jednak przejdę do szerszego zagadnienia stereotypów społecznych i błędów poznawczych, chcę naświetlić przypadek, w którym dążenie do eleganckiej matematyki wpływa na nasze życie nieco bardziej, niż czynią to teorie grawitacji kwantowej. Mam tu na myśli ekonomię.

∞∞

„Współczesna ekonomia pobłądziła, ponieważ ogół ekonomistów pomylił piękno, odziane w zjawiskową matematykę, z prawdą". Tak twierdzi amerykański ekonomista Paul Krugman[6]. Jak wielu fizykom teoretykom, zdarzyło mi się rozważać przejście do ekonomii w nadziei na lepsze perspektywy zatrudnienia. Stosowana w niej matematyka nie wywarła na mnie wrażenia, zadziwił mnie natomiast dojmujący brak danych. Nie nazwałabym ekonomii piękną, ale trzeba przyznać, że była stosunkowo prosta. Zbyt prosta, pomyślałam. Oczekiwać, że cząstki elementarne przestrzegają prostych, uniwersalnych praw, to jedna rzecz. Co innego spodziewać się, że podobnie jest z ludźmi.

Rzecz jasna nie byłam pierwszym fizykiem, który uznał, że ekonomia skorzystałaby na bardziej wyrafinowanej matematyce. Doyne Farmer jest jednym z pionierów ekonofizyki – dyscypliny stosującej metody matematyczne fizyki do zagadnień ekonomicznych. Doyne, specjalista w dziedzinie teorii chaosu i dynamiki nieliniowej, obecnie kieruje Centrum Ekonomii Złożoności przy Instytucie Nowej Myśli Ekonomicznej (*Complexity Economics Programme at the Institute for New Economic*

Thinking) w Oxford Martin School. Kontaktuję się z nim, żeby spytać, co sądzi o eleganckich teoriach ekonomicznych.

– Jedną z dziwnych rzeczy w ekonomii jest to, że teorie wpisują się w pewien szablon – mówi Doyne. – W jego ramach rozważa się układy agentów samolubnie maksymalizujących swoje korzyści. Jeśli twój model tego nie zawiera, to usłyszysz, że jest pozbawiony treści ekonomicznej. Obowiązuje koncepcja, że wszystkie teorie muszą być zgodne z tą zasadą. I jest to silnie egzekwowane, szczególnie w tak zwanych prestiżowych czasopismach. W ekonomii mamy do czynienia z bardzo wyraźną hierarchią czasopism – wyjaśnia. – Funkcjonuje około trzystu pięćdziesięciu tytułów, które znają nawzajem swoją pozycję; wiadomo, że taki a taki jest na dwudziestym miejscu, inny na trzydziestym i tak dalej. Opublikowanie artykułu w którymkolwiek czasopiśmie z pierwszej piątki to nie lada osiągnięcie. Jedna publikacja może ci zapewnić stały etat profesorski na dobrym uniwersytecie.

– Wow – mówię. – To nawet gorzej niż w fizyce.

– Owszem, jest gorzej w takim sensie, że panuje wysoki poziom konformizmu. Wytworzyły się bardzo rygorystyczne kryteria co do tego, jak artykuł powinien być napisany, co do stylu i sposobu prezentacji, jak również co do samego rodzaju teorii: czy istnieje łączność z przekonaniami głównego nurtu na temat tego, jak dana teoria powinna wyglądać. Zgodnie z nimi powinna ona formułować eleganckie lub wręcz piękne argumenty. Tymczasem w moim odczuciu wcale nie są one tak piękne czy eleganckie. To znaczy może i w jakimś sensie są, ale nie wierzę w poprawność formalizmu, na którym się opierają. Szczerze mówiąc, wydaje mi się trochę niedorzeczny. Ale to nie tak jak w teorii strun – ciągnie. – Tam przynajmniej można twierdzić, że otrzymuje się jakieś ciekawe, oryginalne wyniki matematyczne. W ekonomii nie ma jednak ani głębokiej, ani oryginalnej matematyki. To trochę takie

podniecanie się standardowymi narzędziami analizy matematycznej. Nie sądzę, by ekonomiści wnosili dziś jakiś większy wkład do matematyki.

Doyne mówi dalej:

– Być może okaże się, że mają rację i znajdą to, czego szukają. Ale moim zdaniem jest jasne, że standardowe modele ekonomiczne są w najlepszym razie tylko częściowo skuteczne. Ma to, jak sądzę, związek z tym, że niektóre z założeń w tych modelach są przyjmowane nie tyle po to, żeby opisywać rzeczywistość, ile w celu uzyskania eleganckich wyników. Należałoby odrzucić przynajmniej część z tych założeń, żeby osiągnąć postęp. Weźmy pojęcie równowagi – tłumaczy Doyne. – Ekonomiści je lubią, bo gdy w modelu założy się równowagę, łatwo jest uzyskiwać wyniki. Ale z drugiej strony, jeśli nie tak działa świat, jeśli nie tak funkcjonuje gospodarka, to jest to nic innego jak marnowanie czasu. I według mnie w wielu przypadkach tak właśnie jest.

Równowaga w ekonomii odnosi się do stabilnego stanu, w którym wielkości podaży i popytu są sobie równe, a ceny dóbr osiągają optimum.

– Pamiętam, że czytałam niektóre twoje artykuły krytykujące teorię równowagi, ale to było z dziesięć lat temu – mówię[7]. – Sądziłam, albo wręcz miałam nadzieję, że od tego czasu zdano sobie sprawę z jej nazbyt uproszczonego charakteru. Ekonomia musi być strasznie skomplikowana, gdy chodzi o dopasowywanie teorii do danych. Inaczej niż w fizyce, gdzie mogę przynajmniej zrozumieć, że zakłada się prostotę praw. Tu jednak spodziewam się, że chcąc odwzorowywać rzeczywistą gospodarkę, będziecie musieli wesprzeć się komputerami.

– W pełni się zgadzam i staram się popychać ludzi w tę stronę, ale stanowimy mniejszość.

– To mnie dziwi – przyznaję – bo sądziłam, że w dobie metod opartych na *big data* ekonomia będzie pierwszą dziedziną, która po nie sięgnie.

– Ekonomiści co prawda zastrzygli uszami – odpowiada Doyne – ale te metody są bardzo odmienne od tego, co dotąd znali, i trochę to potrwa.

– Jak to się stało, że ekonomiści stali się aż takimi fanami matematyki? – pytam.

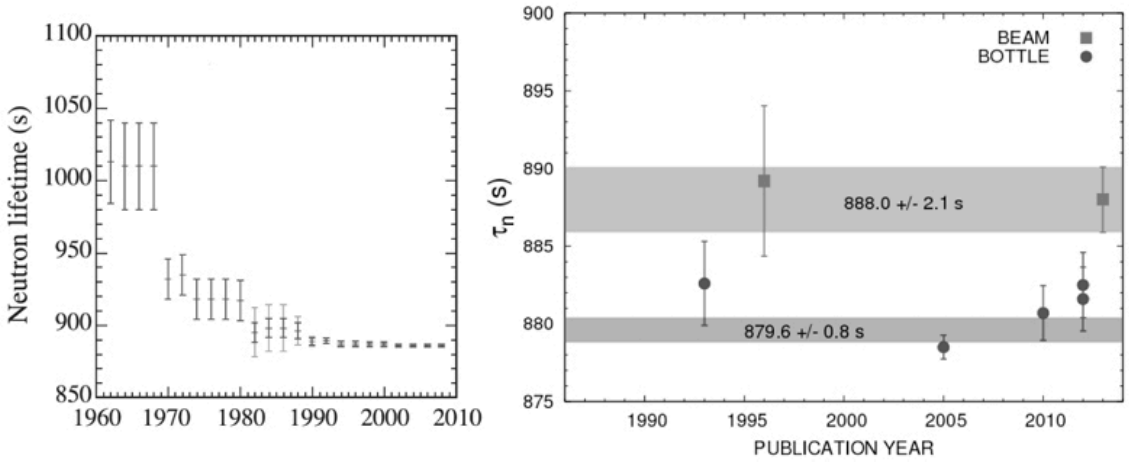
– Matematyka jest obecna w fizyce z dobrych powodów – wyjaśnia. – Dostarcza potężnych narzędzi do wyprowadzania logicznych konsekwencji z zestawu przyjętych założeń. Idea, by postępować tak samo w naukach społecznych, jest bardzo podniecająca. To nie w samej matematyce tkwi problem. Obawiam się, że matematyzacja współczesnej ekonomii stała się dominującym podejściem nie dlatego, że dostarcza dobrego opisu świata, lecz dlatego, że jest elegancka i pozwala na ścisłe dowodzenie swoich twierdzeń. Dzisiejszy ekonomista to matematyk szukający swoich kluczy pod latarnią. Piękno jest świetne i jestem całkowicie za elegancją – mówi Doyne. – Ale zaczynam się martwić, gdy widzę zbyt wiele matematyki na matematyce opartej na matematyce, nawet jeśli cała konstrukcja jest bardzo elegancka. Teoria może być matematycznie bez zarzutu, ale na ile możemy być pewni, że wciąż odnosi się do rzeczywistego świata?

Nie ufaj mi, jestem naukowcem

Nie wiem, czy znana jest czytelnikowi osobliwa historia życia neutronu. Neutrony zbudowane są z trzech kwarków i stanowią wraz z protonami składniki jąder atomowych. Te ostatnie są na szczęście stabilne, ale kiedy wyciągnąć z jądra pojedynczy neutron, ulegnie on rozpadowi, przy czym średni czas życia tej

cząstki wynosi około 10 minut. A dokładniej: 885 sekund plus minus 10. Osobliwa część tej historii dotyczy owego „plus minus”.

Czas życia neutronu mierzono ze stale zwiększającą się precyzją, począwszy od lat pięćdziesiątych XX wielu (rysunek 15, po lewej). Obecnie stosuje się dwie różne techniki pomiarowe, które dają odmienne rezultaty (rysunek 15, po prawej). Ich rozbieżność jest większa, niż dopuszcza niepewność pomiarowa – szansa, że uzyskane wartości są wynikiem przypadku, jest jak 1 do 10 000[8]. To dość zagadkowa sytuacja, która może być zwiastunem nowej fizyki. Nie na to chciałam jednak zwrócić uwagę.



Rysunek 15. Wyniki pomiarów średniego czasu życia neutronu w zależności od roku. Źródła: C. Patrigiani et al. (Particle Data Group), *Review of particle physics*, „Chin. Phys. C” 40: 100001, 2016 (słupki błędów mają szerokość 1 σ); J.D. Bowman et al., *Determination of the free neutron lifetime*, 2014, arXiv:1410.5311 [nucl-ex].

Spójrzmy ponownie na wykres po lewej stronie rysunku 15. Małe poziome kreseczki znajdujące się na środku pionowych odcinków to wyniki pomiarów, a same odcinki odzwierciedlają ich niepewność. Zauważmy, że dane zmieniają się w czasie schodkowo, kilka razy przeskakując do nowych wartości, które znacznie różnią się od tych podawanych wcześniej, niekiedy

nawet wykraczając poza przedział niepewności. Wydaje się, że doświadczalnicy nie tylko nie doszacowywali niepewności pomiarowej, lecz starali się też dopasowywać uzyskane przez siebie dane do wcześniejszych rezultatów. Okazuje się, że średni czas życia neutronu wcale nie jest jedyną wielkością fizyczną, której zmierzone wartości ulegały z czasem takim skokowym zmianom. W ostatnich dziesięcioleciach podobne zjawisko dotyczyło co najmniej kilkunastu czasów życia, mas i współczynników rozpraszania innych cząstek[9].

Nigdy nie będziemy mieć pewności, dlaczego tak się stało. Prawdopodobne wyjaśnienie jest takie, że doświadczalnicy podświadomie usiłowali uzyskać takie wyniki, jakie były im znane. Nie mam na myśli celowego fałszerstwa. Chodzi po prostu o to, że otrzymując rezultat niezgodny z istniejącą literaturą, badacze są bardziej skłonni uznać, że popełnili błąd, niż kiedy ich pomiar wstrzeliwuje się idealnie w dotychczasową wiedzę. W ten sposób badania mogą ulegać wypaczeniu w kierunku potwierdzania poprzednich wyników.

Jednak doświadczalnicy zdali sobie sprawę z problemu i podjęli stosowne kroki. Jak widać, najnowsze pomiary wcale *nie są* zgodne (rysunek 15, po prawej). Obecnie w wielu grupach badawczych panuje praktyka, by wybierać metodę analizy danych jeszcze przed zapoznaniem się z wynikami pomiarów (zanim dane zostaną „odtajnione”), a następnie po prostu trzymać się uprzednio wybranej procedury. Ma to chronić przed skłonnością do wypróbowywania różnych metod analizy w sytuacji, gdy rezultat różni się od spodziewanego.

Także w naukach o życiu mamy ostatnio do czynienia z kryzysem na polu replikacji wyników, który doprowadził do zwiększenia wysiłków na rzecz ochrony przed wypaczeniami na etapie projektowania eksperymentów, analizy statystycznej oraz

recenzji[10]. Sporo pozostaje jeszcze do zrobienia, ale zawsze to jakiś początek.

W fizyce teoretycznej aparaturą, na której pracujemy, są nasze mózgi. A jednak nie robimy nic, żeby zminimalizować wypaczenia w ich funkcjonowaniu. Co prawda w naszej dziedzinie nie da się przedstawiać postępów na prostych wykresach, ale gdyby było to możliwe, z pewnością także wśród teoretyków zauważylibyśmy tendencję do potwierdzania istniejących rezultatów. Na temat niektórych zagadnień napisaliśmy tyle artykułów, że wyrosły na nich całe samowystarczalne obszary badawcze, niekiedy przy zupełnym braku dowodów empirycznych. Mowa o wyrafinowanych, teoretycznych konstrukcjach, które może i są poddawane szczegółowym testom, ale tylko pod kątem spójności matematycznej. Proponowanie alternatywnego rozwiązania, które też jest matematycznie spójne, stanowi tu odpowiednik rezultatu niezgodnego z istniejącą literaturą.

Weźmy takie parowanie czarnych dziur. Nie istnieją żadne obserwacje. Paradoks ściany ognia (rozdział 8) ujawnił, że najlepiej przebadana próba rozwikłania problemu utraty informacji w czarnej dziurze – dualność cechowania/grawitacji – łamie zasadę równoważności. A zatem wcale nie rozwiązuje postawionego przed nią problemu, ponieważ nie daje się pogodzić z głównym postulatem ogólnej teorii względności[11]. Niemniej istnieje tak wiele wcześniejszych prac faworyzujących to podejście, że odrzucenie go jest nie do pomyślenia. Zamiast tego fizycy teoretycy prześcigają się obecnie w próbach uzgodnienia rezultatów Polchinskiego z wcześniejszymi pracami poprzez modyfikowanie mechaniki kwantowej.

Przykładowo Juan Maldacena i Leonard Susskind zaproponowali, że para splątanych cząstek jest połączona za pośrednictwem tuneli czasoprzestrzennych[73*], czyli bardzo silnych zniekształceń czasoprzestrzeni łączących dwa uprzednio odległe

obszary swego rodzaju krótkim „mostem”[12]. Dzięki temu nielokalność przestaje być „upiorna” i staje się po prostu właściwością naszego wszechświata, poprzebijanego tunelami w czasie i przestrzeni. Takie tunele łączyłyby w szczególności pary cząstek promieniowania Hawkinga, za jednym zamachem rozwiązując problem ściany ognia oraz problem utraty informacji. Ideę tę udało się rozwinąć dla czasoprzestrzeni z ujemną stałą kosmologiczną, więc nie opisuje ona wszechświata, który zamieszkujemy. Uczeni liczą jednak na to, że w rzeczywistości jest to ogólna zasada, która obowiązuje także w naszym kosmosie[13].

Być może mają rację. To nowa i ekscytująca idea. Jeśli przyroda faktycznie działa w ten sposób, byłoby to niesamowite odkrycie. W dodatku tak pięknie pasuje do wszystkich wcześniejszych rezultatów.

Ten namiot cuchnie

Umiłowanie piękna i potrzeba wpasowywania się to typowo ludzkie cechy. Niemniej wpływają one na naszą obiektywność. Prowadzą do błędów poznawczych, przez które nauka nie działa optymalnie i na które nie bierze się obecnie poprawki. Niestety nie są to jedyne tego typu błędy popełniane przez teoretyków. O ile doświadczalnicy wkładają wiele wysiłku, by zminimalizować zniekształcenia natury statystycznej, o tyle teoretycy prowadzą swoje rozważania z niezmąconym spokojem, beztrosko wierząc, że potrafią wyrozumować prawidłowe prawa przyrody.

Ludzkie błędy poznawcze nie są, ogólnie rzecz biorąc, czymś złym. Większość z nich rozwinęła się dlatego, że są one – a przynajmniej były – dla nas korzystne. Jesteśmy na przykład bardziej skłonni głosić opinie, które, jak sądzimy, będą dobrze przyjęte przez innych. Ten tak zwany efekt społecznych oczekiwań stanowi skutek uboczny naszej potrzeby przynależności do grupy w celu przetrwania. Nie powiesz wodzowi plemienia, że jego

namiot cuchnie, jeśli za tobą stoi dziesięciu jego współplemieńców uzbrojonych w włócznie. Sprytnie. Lecz o ile oportunizm może zwiększać szanse przetrwania, o tyle rzadko skutkuje odkryciami i przyrostem wiedzy.

W nauce prawdopodobnie najbardziej rozpowszechnioną usterką umysłu jest tak zwany efekt potwierdzenia, nazywany także błędem konfirmacji. To przez niego wertujemy literaturę w poszukiwaniu czegoś, co wesprze nasz argument. To przez niego szukamy nieprawidłowości w eksperymencie, którego wynik rozminął się z naszymi oczekiwaniami. To przez niego unikamy osób zadających niewygodne pytania. To właśnie efekt potwierdzenia powoduje, że ilekroć próbujemy przedstawiać korzyści płynące z badań podstawowych, kończy się to przekonywaniem już przekonanych. Czytelnik z pewnością doskonale wie, że bez odkrywania fundamentalnie nowych praw przyrody rozwój techniczny w końcu by się zatrzymał, prawda?

Istnieją jednak inne, mniej znane błędy poznawcze i stereotypy społeczne mające wpływ na naukę[14]. Jednym z nich jest poznanie motywowane[15]. Prowadzi ono do tego, że zawyżamy rzeczywiste szanse na pozytywny obrót spraw. Wystarczy przypomnieć sobie głosy mówiące, że LHC najprawdopodobniej odkryje zjawiska wykraczające poza model standardowy. Albo zapowiedzi, że w ciągu kilku najbliższych lat uda się znaleźć eksperymentalny dowód na istnienie cząstek ciemnej materii. Ba, niczego nie musimy sobie przypominać – wciąż się to słyszy.

Dalej mamy „błąd poniesionych kosztów”, który można streścić zdaniem: „skoro tyle już zainwestowałem, to nie mogę się teraz wycofać”. Im więcej czasu i wysiłku włożyliśmy w poszukiwanie supersymetrii, tym trudniej jest nam przestać, nawet jeśli szanse na sukces stają się coraz bardziej nikłe. Mimo iż to, co robimy, dawno przestało być obiecujące, idziemy za ciosem, ponieważ zbyt wiele już zainwestowaliśmy i nie chcemy się przyznać do

pomyłki. To w związku z tym Planck miał zażartować, że „nauka posuwa się naprzód z każdym kolejnym pogrzebem”[16].

Efekt faworyzowania „swoich” sprawia, że naukowców reprezentujących naszą własną dziedzinę badań uważamy za inteligentniejszych od innych. Efekt wspólnej wiedzy tłumaczy, dlaczego dyskutujemy o tym, co wszyscy wiedzą, ale nie zwracamy uwagi na wiedzę będącą w posiadaniu ledwie kilku osób. Mamy skłonność do dostrzegania wzorców i związków nawet tam, gdzie ich nie ma (apofenia). Postrzegamy argumenty jako silniejsze, jeśli prowadzą do konkluzji zgodnej z oczekiwaniami (efekt przekonania). Z kolei efekt halo wyjaśnia, dlaczego czytelnika bardziej interesuje to, co ma do powiedzenia laureat Nagrody Nobla, niż to, co mówię ja – i to niezależnie od tematyki.

Istnieje również efekt błędnego konsensusu: jesteśmy skłonni do wyolbrzymiania liczby zgadzających się z nami osób, jak również stopnia ich zgody. Natomiast jedno z najbardziej problematycznych zjawisk psychologicznych w nauce polega na tym, że tezy wydają nam się tym bliższe prawdy, im częściej o nich słyszymy. Mowa o „tendencyjności uwagi” lub „efekcie czystej ekspozycji” (por. rozdział 7). Dana informacja przemawia do nas zwłaszcza wtedy, gdy powtarzają ją członkowie naszej własnej społeczności. Takie wewnątrzgrupowe wzmacnianie może zamykać całe społeczności naukowe w swego rodzaju bańkach informacyjnych, w obrębie których badacze wymieniają się wciąż tymi samymi argumentami, nieustannie upewniając się nawzajem, że obrali właściwy kurs.

Jest wreszcie istny diabeł wśród błędów poznawczych, najbardziej perfidny ze wszystkich. Chodzi o tak zwany efekt ślepej plamki, czyli upieranie się, że nasza własna percepcja jest w porządku. To on sprawia, że moi koledzy po fachu tylko się śmieją, gdy mówię im, że błędy poznawcze stanowią problem,

i zbywają moje „społeczne argumenty” jako nieistotne w naukowym dyskursie. Jednak istnienie tych efektów psychologicznych zostało potwierdzone w niezliczonych badaniach. I absolutnie nic nie wskazuje na to, że inteligencja może przed nimi uchronić; nie stwierdzono żadnego związku między zdolnościami kognitywnymi a błędami w myśleniu[17].

Oczywiście nie jest tak, że tylko fizycy teoretycy padają ofiarą błędów poznawczych. Analogiczne problemy można dostrzec we wszystkich dziedzinach nauki. Nie jesteśmy w stanie porzucić kierunków badawczych, które okazują się bezowocne; jesteśmy kiepscy w przyswajaniu nowej informacji; nie krytykujemy pomysłów swoich kolegów, bo nie chcemy stać się „społecznie niepożądani”. Lekceważymy idee spoza głównego nurtu jako pochodzące od „nie swoich” ludzi. Godzimy się na reguły, które naruszają naszą intelektualną niezależność, bo wszyscy tak robią. A przy tym wszystkim uparcie twierdzimy, że postępujemy zgodnie z dobrą praktyką badawczą, a na nasz osąd nie wpływają ani żadne efekty społeczne, ani psychologiczne, nieważne, jak dobrze udokumentowane, bo to po prostu niemożliwe i już.

Rzecz jasna od zawsze zmagaliśmy się z tymi efektami. To właśnie z ich powodu współcześni naukowcy stosują zinstytucjonalizowane sposoby na zwiększenie obiektywności, w tym system recenzji metodą *peer review*, miary istotności statystycznej oraz wytyczne dobrej praktyki badawczej. Dzięki nim nauka posuwała się naprzód zupełnie dobrze, więc niby czemu nagle powinniśmy to kwestionować? (Nawiasem mówiąc, ostatnie zdanie to ilustracja tak zwanego efektu *status quo*).

Większe grupy są mniej skuteczne w dzieleniu się istotną informacją[18]. Co więcej, im bardziej wyspecjalizowana jest dana grupa, tym bardziej jej członkowie są skłonni dawać posłuch wyłącznie temu, co zgadza się z ich punktem widzenia. Właśnie dlatego zrozumienie przepływu wiedzy w społecznościach

naukowych jest dziś znacznie ważniejsze, niż było sto, a nawet dwadzieścia lat temu. Obiektywna argumentacja staje się tym bardziej istotna, im bardziej polegamy na logicznym rozumowaniu pozbawionym wsparcia ze strony eksperymentu. Spośród wszystkich dziedzin nauki problem ten najsilniej dotyka pewnych obszarów fizyki teoretycznej – na nich właśnie skupia się ta książka.

Doświadczalnicy mają oczywiście własne cele. Marzy im się rozwój nowych technologii, więc wcale nie jest tak, że decyzje na temat przyszłych eksperymentów zostawiają wyłącznie teoretykom. Wciąż jednak to teoretycy wybierają obszary w przestrzeni parametrów, które warto zbadać. Spoczywa na nas odpowiedzialność, by ocenić nasze teorie tak obiektywnie, jak to możliwe, i w ten sposób pomóc wyłonić najbardziej obiecujące nowe eksperymenty.

Bez względu na dziedzinę badań, dopóki teorie są rozwijane przez ludzi, dopóty musimy domyślnie zakładać, że jakakolwiek ocena teorii jest obarczona zarówno błędami poznawczymi, jak i stereotypami społecznymi, chyba że podjęto środki zaradcze. Obecnie jednak takich środków się nie stosuje. A zatem postęp jest niemal na pewno wolniejszy, niż mógłby być.

Jak to się stało, że znaleźliśmy się w takiej sytuacji? Ponieważ nam, naukowcom, najłatwiej jest obwiniać ciała rządzące lub agencje finansujące badania, głosów krytycznych nie brakuje: na łamach „Nature” i „Times Higher Education” bodaj co tydzień ukazują się tyrady na temat absurdalnych prób mierzenia sukcesu naukowego. Ilekroć udostępniam je na Facebooku, kciuki w górę mam gwarantowane. A mimo to nic się nie zmienia.

Narzekanie na innych nie pomaga, ponieważ ten problem ściągnęliśmy na siebie sami – i sami musimy go rozwiązać. Nie udało nam się ochronić naszej zdolności do obiektywizmu. Pozwoliliśmy się wpędzić w kozi róg, w którym jesteśmy rutynowo

zmuszani kłamać, jeśli chcemy kontynuować nasze badania. To, że akceptujemy taką sytuację, stanowi porażkę świata nauki i to na nas spoczywa odpowiedzialność, by ją naprawić.

Krytykowanie własnego plemienia nigdy nie było popularne. Ale nasz namiot cuchnie.

∞∞

Krytyka jest tania, jak mawiają krytycy. Poświęciłam dziewięć rozdziałów na przekonywanie, że fizyka teoretyczna zafiksowała się na przebrzmiałych ideałach piękna, ale czy mam w takim razie jakiś pomysł, co fizycy teoretycy powinni w tej sytuacji zrobić? Czy mam do zaoferowania jakąś alternatywę?

Nie dysponuję cudownym lekiem na problemy stojące przed fizykami teoretykami, a gdybym twierdziła inaczej, radziłabym mnie wyśmiać. Jednak samo utyskiwanie na zły wpływ czynników estetycznych nie sprawi, że te trudne problemy znikną. Poniżej przedstawiam pewne przemyślenia, od czego zacząć. Oczywiście mam tu swoje osobiste preferencje, jak każdy. Sama też nie jestem obiektywna.

Moje intencje są tu dość szerokie i wykraczają poza dziedzinę, którą reprezentuję. Błędy poznawcze i stereotypy społeczne stanowią zagrożenie dla metody naukowej jako takiej. Stoją na drodze postępu. Choć nigdy nie będziemy w stanie uwolnić się do reszty od ludzkich pomyłek, nie wolno nam po prostu zaakceptować bieżącej sytuacji. Możemy przynajmniej nauczyć się rozpoznawać problemy i zapobiegać ich eskalacji wskutek szkodliwych praktyk. W Dodatku C zebrałam kilka praktycznych sugestii na ten temat.

Jak powiedziałam, matematyka pozwala nam zachować rzetelność. Chroni nas przed okłamywaniem samych siebie i innych. Z matematyką można się mylić, ale nie da się kłamać. To prawda – nie da się kłamać w języku matematyki. Ale potrafi on nieźle zaciemnić.

Przypomnijmy sobie świątynię wiedzy, w której podstawy fizyki znajdują się na najniższym poziomie, a my, fizycy teoretycy, usiłujemy przebić się jeszcze niżej w poszukiwaniu głębszego zrozumienia. U kresu moich podróży zaczynam się obawiać, że pęknięcia, które widzimy na posadzce, wcale nie są pęknięciami, lecz jedynie misternym wzorem. Kopiemy nie tam, gdzie trzeba.

Jak wyjaśniłam, większość zagadnień, którymi obecnie zajmujemy się w fizyce fundamentalnej, ma związek z numerycznymi koincydencjami. Precyzyjne dostrojenie masy Higgsa, silny problem CP, mała wartość stałej kosmologicznej – nie są to niespójności; to przeczucia natury estetycznej.

Tymczasem w historii naszej dziedziny matematyczna dedukcja prowadziła nas tylko wówczas, gdy mieliśmy faktyczny problem ze spójnością. Niespójność szczególnej teorii względności z newtonowską teorią grawitacji doprowadziła do powstania ogólnej teorii względności. Niespójności między szczególną teorią względności a mechaniką kwantową zrodziły kwantową teorię pola. Załamywanie się probabilistycznej interpretacji modelu standardowego pozwoliło nam dojść do wniosku, że LHC musi odkryć nowe efekty fizyczne, które ujawniły się pod postacią bozonu Higgsa. To właśnie były kwestie, z którymi można było się mierzyć za pomocą matematyki. Jednak większość problemów, z którymi zmagamy się dzisiaj, nie jest tego rodzaju. Jedynym wyjątkiem jest kwantyzacja grawitacji.

Tak więc moja pierwsza lekcja jest następująca: jeśli chcesz rozwiązać problem za pomocą matematyki, wpierw upewnij się,

że faktycznie masz do czynienia z problemem.

Fizycy teoretycy szczycą się swoim doświadczeniem i intuicją. Nie mam nic przeciwko kierowaniu się intuicją w formułowaniu założeń, które dadzą się uzasadnić dopiero później (albo i nie). Musimy jednak o nich stale pamiętać, bo w przeciwnym razie ryzykujemy, że zaczną być powszechnie przyjmowane mimo braku uzasadnienia. Założenia bazujące na intuicji często mają charakter przednaukowy i jako takie należą do domeny filozofii. W związku z tym potrzebujemy pomocy filozofów, aby pomogli nam zrozumieć, jak możemy uczynić nasze intuicje bardziej naukowymi.

Dlatego moja druga lekcja brzmi: wyraźnie formułuj swoje założenia.

Tego typu założeniem jest naturalność. Jest nim także prostota, albowiem z redukcjonizmu nie wynika stały wzrost prostoty w miarę zmniejszania skali. Zamiast tego być może będziemy musieli przebyć etap (w sensie zakresu skal), w którym nasze teorie staną się ponownie bardziej skomplikowane. Poleganie za założeniu prostoty, w formie unifikacji lub spadku liczby aksjomatów, może nas wywieść w pole.

Jednak nawet dla dobrze postawionych problemów i przy jasno określonych założeniach wciąż może istnieć wiele matematycznie możliwych rozwiązań. Koniec końców jedynym sposobem na to, by dowiedzieć się, która teoria jest poprawna, jest doświadczalne sprawdzenie, czy trafnie opisują one rzeczywistość. Nieempiryczna ocena teorii tego nie zastąpi. W poszukiwaniach teorii grawitacji kwantowej oraz lepszego formalizmu dla fizyki mikroświata jedyna droga naprzód wiedzie przez wyprowadzanie i późniejsze testowanie kolejnych przewidywań.

A zatem moja trzecia i ostatnia lekcja jest taka: wsparcie ze strony obserwacji jest niezbędne.

Fizyka nie jest matematyką. To wybieranie właściwej matematyki.

Poszukiwania trwają

22 czerwca 2016: pojawiają się pierwsze plotki, że dwufotonowe wybrzuszenie na wykresach z LHC maleje wraz z napływem nowych danych.

21 lipca 2016: eksperyment LUX wypatrujący ciemnej materii kończy swoje poszukiwania, donosząc o braku sygnałów WIMP-ów.

29 lipca 2016: pogłoski o zniknięciu anomalii dwufotonowej zataczają coraz szersze kręgi.

4 sierpnia 2016: zostają opublikowane nowe dane z LHC. Potwierdzają, że po dwufotonowej sensacji nie pozostał żaden ślad. W czasie ośmiu miesięcy od „odkrycia" tej, jak się okazało, statystycznej fluktuacji napisano ponad pięćset artykułów naukowych. Wiele z nich opublikowano w najbardziej prestiżowych czasopismach z dziedziny. Najpopularniejsze z nich zacytowano już ponad trzysta razy. Jeśli czegokolwiek nas to uczy, to tego, że dzisiejsi fizycy teoretycy są w stanie błyskawicznie podać setki wyjaśnień dla dowolnego zestawu danych, jaki zostanie im podsunięty.

W kolejnych tygodniach Frank Wilczek ostatecznie przegrywa swój zakład z Garrettem Lisim, że supersymetria zostanie wykryta w LHC. Analogiczny zakład zawarty na konferencji w 2000 roku również rozstaje rozstrzygnięty na korzyść strony anty-SUSY[19].

W międzyczasie ja także wygrywam zakład. Założyłam się sama ze sobą, że moi koledzy nie przestaną ponosić porażek, a moja książka nie ulegnie dezaktualizacji przed jej ukończeniem. Szanse były po mojej stronie – badacze od trzydziestu lat próbują w kółko tego samego, oczekując odmiennych rezultatów.

W październiku eksperyment CDEX-1 donosi, że nie wykrył żadnych aksjonów.

Jak długo można czekać, aż dana teoria zostanie wsparta przez dowody empiryczne? Nie wiem. Nie sądzę nawet, by to pytanie miało sens. Być może cząstki, których szukamy, są tuż za rogiem i ich odkrycie jest tylko kwestią technicznego kunsztu.

Jednak bez względu na to, czy je znajdziemy, czy też nie, jasne jest, że stare reguły rozwijania teorii już się wyczerpały. Pięćset teorii na wyjaśnienie zjawiska, którego nie było, oraz 193 modele wczesnego wszechświata stanowią wystarczająco wymowne dowody, iż bieżące standardy jakości nie spełniają już swojej roli w ocenianiu naszych teorii. Aby móc wyłonić obiecujące projekty przyszłych eksperymentów, potrzebujemy nowych reguł.

W październiku 2016 roku w Karlsruhe, w Niemczech, rozpoczął swoje działanie eksperyment KATRIN. Jego zadaniem jest zmierzenie jak dotąd nieznanych bezwzględnych mas neutrin. W 2018 roku[74*] budowana obecnie sieć radioteleskopów pod nazwą *Square Kilometre Array* zacznie przeczesywać niebo w poszukiwaniu sygnałów z najwcześniejszych galaktyk. W nadchodzących latach eksperymenty *g−2* w Fermilabie w Chicago oraz w J-PARC w Tokio zmierzą z niebywałą dokładnością moment magnetyczny mionu, potencjalnie rozstrzygając pewien utrzymujący się od kilkunastu lat konflikt między doświadczeniem a teorią[75*]. Europejska Agencja Kosmiczna zbadała grunt pod planowany kosmiczny interferometr laserowy eLISA, który byłby w stanie wykrywać fale grawitacyjne w dotychczas niezbadanych zakresach częstotliwości, dostarczając nowych szczegółów na temat przebiegu inflacji[76*]. Wiele z danych zebranych przez LHC dopiero czeka na analizę, toteż wciąż możemy natknąć się na oznaki nowej fizyki wykraczającej poza model standardowy.

Wiemy, że znane nam prawa przyrody są niekompletne. Aby je uzupełnić, musimy zrozumieć kwantowe właściwości przestrzeni i czasu, modyfikując albo teorię względności, albo teorię kwantów. A być może obie. Odpowiedź bez wątpienia przyniesie nowe pytania.

Mogłoby się wydawać, że fizyka miała swoją złotą erę w minionym wieku, lecz teraz nadeszło stulecie neuronauk, bioinżynierii lub sztucznej inteligencji (zależy kogo pytać). Myślę, że to nieprawda. Dostałam nowy grant badawczy. Przed nami sporo pracy. Następny wielki przełom w fizyce nastąpi w tym stuleciu.

Będzie przepiękny.

Podziękowania

Jestem wdzięczna wszystkim tym, którzy udzielili mi wywiadów pozwalających na odmalowanie tak barwnego obrazu społeczności: Nimie Arkaniemu-Hamedowi, Doyne'owi Farmerowi, Gianowi Francescowi Giudicemu, Gerardowi 't Hooftowi, Gordonowi Kane'owi, Michaelowi Krämerowi, Garrettowi Lisiemu, Katherine Mack, Keithowi Olive'owi, Chadowi Orzelowi, Joemu Polchinskiemu, Stevenowi Weinbergowi, Xiao-Gangowi Wenowi i Frankowi Wilczkowi. Bardzo Wam dziękuję – byliście wspaniali!

Wiele zawdzięczam tym wszystkim, którzy w ciągu lat pomogli mi lepiej zrozumieć rozliczne tematy, których dotyka niniejsza książka: Howiemu Baerowi, Xavierowi Calmetowi, Richardowi Dawidowi, Richardowi Eastherowi, Willowi Kinneyowi, Stacy McGaugh, Johnowi Moffatowi, Florinowi Moldoveanu, Ethanowi Siegelowi, Davidowi Spergelowi, Timowi Taitowi, Tilmanowi Plehnowi, Giorgiemu Torrieriemu i niezliczonej liczbie innych, na których seminariach, wykładach, książkach i artykułach ogromnie skorzystałam.

Dziękuję także ochotnikom, którzy przeczytali szkicowe wersje książki: Niayeshowi Afshordiemu, George'owi Musserowi, Stefanowi Schererowi, Lee Smolinowi i Renate Weineck.

Specjalne podziękowania kieruję do Lee Smolina za to, że w końcu zrozumiał, iż nie uda mu się odwieść mnie od napisania tej książki, a także do mojego agenta Maxa Brockmana oraz ludzi z Basic Books, zwłaszcza Leah Stecher i Thomasa Kellehera za ich wsparcie.

Na koniec pragnę podziękować Stefanowi za tolerowanie dwóch lat przekleństw pod adresem „tej cholernej książki" oraz Larze

i Glorii za tak potrzebne przerwy w pracy.

Książkę tę dedykuję mojej Mamie, która pozwoliła mi zepsuć swoją maszynę do pisania, gdy byłam dziesięciolatką. Zobacz, Mamo, wreszcie się to na coś zdało.

Dodatek A

Cząstki modelu standardowego

Cząstki modelu standardowego (por. rysunek 6) klasyfikuje się ze względu na symetrie cechowania[1]. Fermiony oddziałujące silnie to kwarki, których znamy sześć. Ich nazwy to: górny (u), dolny (d), dziwny (s), powabny (c), niski (b) i wysoki (t). Kwarki górny, powabny i wysoki posiadają ułamkowy ładunek elektryczny 2/3; pozostałe trzy mają ładunek −1/3. W oddziaływaniach między kwarkami pośredniczy osiem bezmasowych gluonów, które są bozonami cechowania oddziaływania silnego. Ich liczba wynika z własności grupy symetrii tego oddziaływania, którą jest SU(3).

Pozostałe fermiony nie uczestniczą w oddziaływaniu silnym i noszą nazwę leptonów. Jest ich również sześć: elektron, mion i taon (każdy o ładunku −1) oraz związane z nimi neutrina: elektronowe, mionowe i taonowe (które są elektrycznie obojętne). W oddziaływaniach elektrosłabych pośredniczy bezmasowy, obojętny foton oraz masywne bozony Z, W^+ i W^-, które posiadają ładunki elektryczne wynoszące odpowiednio 0, +1 i −1. Również tym razem liczba bozonów cechowania ma związek z grupą symetrii, którą w wypadku oddziaływań elektrosłabych jest SU(2) × U(1).

Fermiony dzielą się na trzy generacje, które z grubsza porządkują je według mas. Co jednak ważniejsze, w każdej generacji fermionów musi znajdować się równa liczba kwarków i leptonów, gdyż w przeciwnym razie model standardowy byłby niespójny. Liczba samych generacji nie jest wyznaczona przez wymóg spójności, ale zgromadzone dane silnie wskazują na istnienie tylko trzech[2].

Poza fermionami (kwarki plus leptony) i bozonami cechowania w modelu standardowym jest jeszcze tylko jedna cząstka – bozon Higgsa. Posiada on masę i nie jest bozonem cechowania. Cząstka Higgsa jest elektrycznie obojętna, a jej zadaniem jest nadawanie masy fermionom i niektórym bozonom cechowania.

Rozczarowująco brzydkie, nieprawdaż?

Dodatek B

Kłopoty z naturalnością

Domyślny wybór rozkładu jednostajnego opiera się na wrażeniu, iż jest on intuicyjnie najprostszy. Nie istnieje jednak żadne kryterium matematyczne, które go wyróżnia. W rzeczywistości każda próba sformułowania takiego kryterium w końcu prowadzi z powrotem do założenia, że pewien rozkład prawdopodobieństwa jest preferowany na tle innych. Jedynym sposobem na wyjście z zaklętego kręgu jest dokonanie arbitralnego wyboru. Dlatego naturalność stanowi zasadniczo kryterium natury estetycznej[1].

W pierwszej chwili wydaje się, że można próbować uzasadniać stosowanie rozkładu jednostajnego tym, że nie wprowadza on żadnych dodatkowych parametrów. To oczywiście nieprawda – wprowadza liczbę 1 jako w pewnym sensie typowy rozrzut. „Och – ktoś powie – ale przecież liczba 1 jest jedyną dopuszczaną przez warunek naturalności". Cóż, to zależy od przyjętej definicji tego warunku. Przypomnijmy, że zdefiniowaliśmy naturalność w terminach prawdopodobieństwa przypadkowego wystąpienia danej liczby. Ale względem jakiego rozkładu? I tak w kółko.

Aby lepiej zrozumieć, dlaczego mamy tu do czynienia z błędnym kołem, rozważmy rozkład prawdopodobieństwa na przedziale od 0 do 1, który w otoczeniu pewnej wartości ma ostre maksimum o szerokości, powiedzmy, 10^{-10}. „Aha! – ktoś zakrzyknie. – Wprowadziłaś małą liczbę! Precyzyjne dostrojenie!" Nie tak szybko. Owszem, jest to dostrojenie z punktu widzenia rozkładu jednostajnego. Ale ja go tu nie używam – używam rozkładu z ostrym maksimum. Zgodnie z tym rozkładem jest bardzo duże prawdopodobieństwo, że dwie losowo wybrane liczby są

w odległości 10^{-10}. „Przecież to błędne koło”, ktoś stwierdzi. Jak najbardziej, i właśnie w tym od samego początku tkwi problem. Rozkład z ostrym maksimum (nie) uzasadnia sam siebie w takim samym stopniu, w jakim czyni to rozkład jednostajny. Który więc jest lepszy?

Tak, wiem, z jakiegoś powodu funkcja stała wydaje się szczególna, w pewnym sensie prostsza. Podobnie 1 wydaje się szczególną liczbą. Czy jednak dochodzi tu do głosu matematyka, czy estetyka?

Można spróbować wejść na metapoziom i zadać sobie pytanie, jaki jest najbardziej prawdopodobny rozkład prawdopodobieństwa. W tym celu musimy zadać rozkład prawdopodobieństwa na przestrzeni rozkładów prawdopodobieństwa, i tak dalej w nieskończoność, co wymaga zadania pewnego związku rekurencyjnego. Liczba 1 faktycznie jest wyróżniona jako element neutralny grupy multiplikatywnej. W związku z tym można się zastanawiać, czy da się skonstruować taki związek rekurencyjny, który w granicy zwróci rozkład o rozrzucie równym 1. Bawiłam się kiedyś tą ideą, ale krótko mówiąc, odpowiedź brzmi „nie”. Aby taka procedura doprowadziła do wyróżnienia jakiegoś rozkładu prawdopodobieństwa, zawsze potrzeba dodatkowych założeń.

Oto nieco dłuższa odpowiedź dla specjalistów, ilustrująca problem. W przestrzeni funkcyjnej istnieje nieskończenie wiele baz, z których żadna nie jest wyróżniona na gruncie samej matematyki. Jesteśmy po prostu bardzo przyzwyczajeni do jednomianów i stąd nasze upodobanie do funkcji stałych, liniowych i kwadratowych. Jednak równie dobrze moglibyśmy zdecydować się na rozkład jednostajny w przestrzeni Fouriera (względem jakiegokolwiek parametru). W istocie można zdefiniować rozkład jednostajny względem dowolnej możliwej bazy i prawie wszystkie takie rozkłady będą się od siebie różnić.

Jeśli więc chcemy posłużyć się metodą rekurencyjną, możemy zastąpić wybór wyróżnionego rozkładu wyborem wyróżnionej bazy przestrzeni funkcyjnej, ale tak czy inaczej, musimy podjąć arbitralną decyzję (sama metoda rekurencyjna również wnosi dodatkowe założenia).

Bez względu na to, czy przekonałam czytelnika, że kryterium naturalności nie ma charakteru matematycznego, lecz zasadniczo estetyczny, który jednak został „zagubiony w matematyce", fakt, iż kwestia wyboru rozkładu prawdopodobieństwa nie jest omawiana w literaturze, powinien dawać do myślenia. Zwłaszcza że jeden z pierwszych artykułów na temat ilościowych miar naturalności pieczołowicie zwracał uwagę, iż „każda miara precyzyjnego dostrojenia, która kwantyfikuje naturalność" wiąże się z wyborem, który „z konieczności wprowadza do całej konstrukcji element arbitralności"[2].

Najnowsze wcielenie technicznej naturalności wykorzystuje wnioskowanie bayesowskie. W tym przypadku arbitralność przenosi się na wybór rozkładów *a priori*[3].

Dodatek C

Jak możesz pomóc?

Aby poprawić bieżącą sytuację, potrzebne są zarówno działania oddolne, jak i odgórne. Mamy do czynienia z problemem interdyscyplinarnym, którego rozwiązanie wymaga wsparcia ze strony socjologii nauki, filozofii, psychologii oraz – co najważniejsze – samych praktykujących naukowców. Szczegóły są różne w zależności od dziedziny badań. Nie ma uniwersalnego sposobu. Oto co możesz zrobić, żeby pomóc.

Jako naukowiec

Zapoznaj się z różnymi rodzajami stereotypów społecznych i błędów poznawczych. Nabierz świadomości, czym są i w jakich okolicznościach najczęściej występują. Przekazuj tę wiedzę swoim kolegom po fachu.

Zapobiegaj stereotypom społecznym i błędom poznawczym. Organizując konferencje, zachęcaj prelegentów, by przedstawiali nie tylko motywacje badawcze, ale także mankamenty omawianych teorii, metod, eksperymentów i tak dalej. Dyskutuj na temat „znanych problemów". Zapraszaj przedstawicieli rywalizujących programów badawczych. Recenzując artykuły, upewniaj się, czy pytania otwarte są odpowiednio podane i omówione. Piętnuj zabiegi marketingowe jako naukowo niestosowne. Nie lekceważ jakiejś dziedziny badań tylko dlatego, że nie prezentuje się wystarczająco efektownie albo z powodu niewielkiej liczby uprawiających ją badaczy.

Strzeż się wpływu mediów, w tym mediów społecznościowych. To, co czytasz, i to, o czym rozmawiają twoi znajomi, wpływa na twoje zainteresowania. Uważaj na to, co wpuszczasz do swojej głowy.

Zastanawiając się nad tematyką przyszłych badań, weź poprawkę na wpływ, jaki mogły wywrzeć na ciebie zbyt często słyszane pozytywne opinie dotyczące danej tematyki badawczej.

Buduj kulturę krytycyzmu. Ignorowanie złych pomysłów nie sprawi, że znikną – wciąż będą zjadać część funduszy przeznaczonych na naukę. Czytaj prace innych uczonych, a swoją krytykę upubliczniaj. Nie besztaj nikogo za wyrażanie krytycznych uwag pod adresem innych – krytykowanie nie musi być bezproduktywne ani agresywne. Obalanie pomysłów to nieodłączna część nauki. Myśl o tym jak o działaniu na rzecz społeczności.

Wyrażaj swój sprzeciw. Jeśli jakaś polityka godzi w twoją obiektywność, bo przykładowo uzależnia przedłużenie finansowania od popularności osiąganej przez wyniki twoich badań, zwróć uwagę decydentom, że koliduje to z dobrą praktyką badawczą i powinno zostać poprawione. Jeśli twój ośrodek szczyci się produktywnością rozumianą jako liczba publikacji i masz poczucie, że tym samym przedkłada ilość nad jakość, wyraź swoją dezaprobatę.

Jako administrator szkolnictwa wyższego, decydent w sektorze nauki, redaktor czasopisma naukowego lub przedstawiciel organu finansującego

Rób swoje. Nie ceduj decyzji na innych. Nie osądzaj naukowców po liczbie zdobytych grantów albo po popularności ich badań – to oceny innych, którzy z kolei polegali na jeszcze innych. Podejmuj decyzje samodzielnie. Bierz odpowiedzialność na siebie. Jeśli musisz stosować miary liczbowe, stwórz swoje własne. A jeszcze lepiej zwróć się do naukowców, by sami zaproponowali takie miary.

Stosuj jasne wytyczne. Jeśli już musisz polegać na zewnętrznych recenzentach, skompiluj listę wskazówek służących możliwie skutecznemu przeciwdziałaniu stereotypom społecznym i błędom poznawczym. Recenzenci nie powinni opierać swojego osądu na podstawie popularności danej dziedziny badań lub osoby. Jeśli szanse

samego recenzenta na zdobycie grantów zależą od kondycji pewnego obszaru badań, to osoba ta jest uwikłana w konflikt interesów i nie powinna recenzować wniosków o dofinansowanie projektów badawczych w tym obszarze. Będzie to problematyczne, ponieważ tego typu konflikt interesów jest dziś wszechobecny. Kolejne trzy podpunkty zawierają sugestie, jak go minimalizować.

Podejmuj trwałe zobowiązania. Musisz wyzbyć się przekonania, że cała praca naukowa może być wykonywana przez postdoków na dwuletnich kontraktach. Stałe etaty profesorskie wprowadzono na uniwersytetach nie bez powodu – i powód ten wciąż jest słuszny. Jeśli wiąże się to ze zmniejszeniem liczby pracowników naukowych, niech tak będzie. Albo produkujemy setki artykułów, o których za dziesięć lat nikt nie będzie pamiętał, albo próbujemy zasiać idee, o których będzie się dyskutowało jeszcze przez stulecia. Wybieraj. Krótkoterminowe finansowanie skutkuje krótkoterminowym myśleniem.

Zachęcaj do zmiany dziedziny. Naukowcy mają naturalną tendencję do trzymania się tego, co już znają. Jeśli jednak perspektywiczność danego kierunku badawczego maleje, trzeba im pomóc go zmienić. W przeciwnym razie skończy się to pompowaniem pieniędzy w dogorywający obszar badań. Dlatego zaoferuj wsparcie w procesie przekwalifikowania oraz jednoroczne lub dwuletnie granty pozwalające na zapoznanie się z podstawami nowej dziedziny i nawiązaniem potrzebnych kontaktów. W tym okresie od uczonych nie powinno się wymagać pisania artykułów naukowych ani wygłaszania referatów na konferencjach.

Zatrudnij zawodowych recenzentów. Stwórz stałe miejsca pracy dla uczonych specjalizujących się w pisaniu obiektywnych recenzji w wybranych obszarach nauki. Eksperci ci nie powinni być aktywnymi badaczami ani też mieć osobistych pobudek do stawania po którejkolwiek ze stron. Spróbuj osiągnąć porozumienie z innymi instytucjami w kwestii liczby tego typu stanowisk.

Wspieraj publikacje krytyczne oraz zawierające negatywne rezultaty. Obecnie nie docenia się roli krytykowania cudzej pracy ani istotności negatywnych rezultatów. Oba te aspekty pracy uczonego są

absolutnie niezbędne do prawidłowego działania metody naukowej. Znajdź sposób, by zachęcać do publikowania tego typu materiałów, na przykład w specjalnych wydaniach czasopism naukowych.

Oferuj szkolenia na temat stereotypów społecznych i błędów poznawczych. Takie kursy powinny być obowiązkowe dla wszystkich pracowników naukowych. Każdy z nas jest częścią większej społeczności i musimy mieć świadomość związanych z tym pułapek mentalnych. Spotkaj się z ekspertami w dziedzinie nauk społecznych, psychologii oraz filozofii nauki i wspólnie opracujcie propozycję wykładów na ten temat.

Pozwól na podział zadań ze względu na specjalizację. Nikt nie jest specjalistą od wszystkiego, więc nie oczekuj tego również od naukowców. Jedni są znakomitymi recenzentami, inni urodzonymi mentorami, jeszcze inni świetnie kierują zespołem, wreszcie są ludzie stworzeni do opowiadania o nauce. Pozwól im na robienie tego, w czym są dobrzy, i jak najlepiej wykorzystuj ich umiejętności, ale nie wymagaj od kogoś, kto większość wieczorów spędza na udzielaniu konsultacji studentom, że jednocześnie będzie przynosił mnóstwo pieniędzy z grantów. Stwórz dla takich ludzi specjalne tytuły, stopnie lub wyróżnienia.

Jako dziennikarz naukowy lub laik

Zadawaj pytania. Nie widzisz nic dziwnego w pytaniu o ewentualny konflikt interesów związany z opłacaniem badań przez przemysł. Należałoby też jednak pytać o konflikty interesów wynikające z krótkoterminowych grantów i umów o pracę. Czy przyszłe finansowanie programu badawczego, o którym właśnie opowiedziała ci grupa naukowców, jest uzależnione od uzyskania przez nich konkretnych wyników?

Analogicznie warto spytać, czy szanse na kontynuowanie ich badań zależą od popularności ich prac wśród innych uczonych. Czy ich obecna pozycja zapewnia stosowną ochronę przed naciskami ze strony otoczenia?

I wreszcie, podobnie jak podczas analizy układu doświadczalnego pod kątem błędów systematycznych, należy upewnić się, czy badacze zadbali o zminimalizowanie możliwych błędów poznawczych. Czy podali

wyważone argumenty za i przeciw, czy też po prostu zachwalali własne badania?

Przekonasz się, że w przypadku prawie wszystkich badań w dziedzinie podstaw fizyki odpowiedź na przynajmniej jedno z powyższych pytań brzmi „nie”. Oznacza to, że niestety nie możesz do końca ufać doniesieniom tych naukowców. Smutne, ale prawdziwe.

Przypisy

Źródła i przypisy

Rozdział 1. Ukryte reguły fizyki

[1] R. Barbieri, G.F. Giudice, *Upper bounds on supersymmetric particle masses*, „Nucl. Phys. B" 306: 63, 1988.

[2] D. Hooper, *Nature's blueprint*, Harper Collins, New York 2008.

[3] J. Forshaw, *Supersymmetry: is it really too good not to be true?*, „Guardian", 9 grudnia 2012.

[4] J. Lykken, M. Spiropulu, *Supersymetria i kryzys w fizyce*, „Świat Nauki" 06, 2014.

[5] Chodzi o twierdzenie Colemana–Manduli. S. Coleman, J. Mandula, *All possible symmetries of the S matrix*, „Phys. Rev." 159: 1251, 1967.

[6] R. Haag, J. Łopuszański, M. Sohnius, *All possible generators of supersymmetries of the S-matrix*, „Nucl. Phys. B" 88: 257, 1975. Założenia można osłabić nawet jeszcze bardziej, ale wydaje się, że nie wynika stąd już nic fizycznie interesującego; por. np. J. Lykken, *Introduction to supersymmetry*, 1996, FERMILAB-PUB-96/445-T, arXiv:hep-th/9612114.

[7] Tymi danymi były ograniczenia nałożone przez eksperymenty na prądy neutralne zmieniające zapach i na elektryczny moment dipolowy. Por. np. A.G. Cohen, D.B. Kaplan, A.E. Nelson, *The more minimal supersymmetric standard model*, „Phys. Lett. B" 388: 588–598, 1996, arXiv:hep-ph/9607394.

[8] G.F. Giudice, *Naturally speaking: the naturalness criterion and physics at the LHC*, 2008, arXiv:0801.2562 [hep-ph].

[9] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, *The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter*, „Phys. Lett. B" 429: 263–272, 1998, arXiv:hep-ph/9803315.

[10] Podobna idea pojawiła się nawet wcześniej u Nordströma w 1905 roku, ale zazwyczaj przypisuje się ją Kaluzie i Kleinowi, gdyż prace Nordströma nie mieściły się w ramach ogólnej teorii względności, wówczas jeszcze nieznanej.

Rozdział 2. Jaki wspaniały świat

[1] S. Chandrasekhar, *Prawda i piękno: estetyka i motywacja w nauce*, tłum. P. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 1999; D. Orrell, *Truth of beauty: science and the quest for order*, Yale University Press, Chicago 2012; I. Stewart, *Dlaczego prawda jest piękna. O symetrii w matematyce i fizyce*, tłum. T. Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012; H. Kragh, *Wielkie spekulacje. Teorie i nieudane rewolucje w fizyce i kosmologii*, tłum. T. Lanczewski, CCPress, Kraków 2016; J.W. McAllister, *Beauty and revolution in science*, Cornell University Press, Ithaca 1996.

[2] Galileusz, *Dialog o dwu najważniejszych układach świata: ptolemeuszowym i kopernikowym*, tłum. E. Ligocki, De Agostini, Warszawa 2004.

[3] Cyt. za: J.W. McAllister, *Beauty and revolution...*, op. cit., s. 178.

[4] I. Newton, *Ogólne scholium* [*do Matematycznych zasad filozofii naturalnej*], tłum. A. Grzeliński, „Studia z Historii Filozofii" 1, 2010.

[5] G. Leibniz, *Rozprawa metafizyczna*, tłum. S. Cichowicz, w: *Wyznanie wiary filozofa. Rozprawa metafizyczna. Monadologia. Zasady natury i łaski oraz inne pisma filozoficzne*, tłum. S. Cichowicz, J. Domański, H. Krzeczkowski, H. Moese, wstęp, oprac. S. Cichowicz, PWN, Warszawa 1969, s. 99.

[6] Mowa o „zasadzie najmniejszego działania".

[7] Cyt. za: nekrolog H. Weyla autorstwa Freemana Dysona, „Nature", 10 marca 1956.

[8] S. Rebsdorf, H. Kragh, *Edward Arthur Milne – the relations of mathematics to science*, „Studies in History and Philosophy of Modern Physics" 33: 51–64, 2002.

[9] Cyt. za: H. Kragh, *Dirac: a scientific biography*, Cambridge University Press, Cambridge 1990, s. 277.

[10] R.H. Dalitz, *A biographical sketch of the life of Professor P. A. M. Dirac, OM, FRS*, w: J.G. Taylor, A. Hilger (red.), *Tributes to Paul Dirac*, Adam Hilger,

Bristol 1987, s. 20, cyt. za: J.W. McAllister, *Beauty and revolution...*, op. cit., s. 16.

[11] H. Kragh, *Dirac: a scientific...*, op. cit., s. 292.

[12] A. Einstein, *O metodzie fizyki teoretycznej*, w: *Jak wyobrażam sobie świat*, tłum. T. Lanczewski, CCPress, Kraków 2017.

[13] H. Poincaré, *Nauka i Metoda*, tłum. M.H. Horwitz, Nakład Jakóba Mortkowicza, Warszawa–Lwów 1911, s. 11.

[14] Ibid., s. 40.

[15] W. Heisenberg, *Część i całość. Rozmowy o fizyce atomu*, tłum. K. Napiórkowski, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1987, s. 96.

[16] E. Heisenberg, *Inner exile: recollections of a life with Werner Heisenberg*, Birkhäuser, Boston 1984, s. 143.

[17] A. Zee, *Fearful symmetry: the search for beauty in modern physics*, Macmillan, New York 1986.

[18] L. Lederman, D. Teresi, *Boska cząstka. Jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?*, tłum. E. Kołodziej-Józefowicz, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012, s. 33.

[19] Model kwarkowy został odkryty niezależnie niemal w tym samym czasie przez George'a Zweiga.

[20] M. Gell-Mann w wystąpieniu TED nagranym w marcu 2007, http://www.ted.com/talks/murray_gell_mann_on_beauty_and_truth_in_physics . Cytat przywołany w tekście widniał na jednym z jego slajdów. On sam powiedział: „W fizyce fundamentalnej mamy to wyjątkowe doświadczenie, że piękno stanowi bardzo skuteczne kryterium wyboru właściwej teorii".

[21] L. Lederman, *The God particle et al.*, „Nature" 448: 310–312, 2007.

[22] S. Weinberg, wywiad dla programu *NOVA* (PBS), przeprowadzony przez Joego McMastera; http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/view-weinberg.html.

[23] F. Wilczek, *Piękne pytanie. Odkrywanie głębokiej struktury świata*, tłum. B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2016, s. 23 oraz 21.

[24] Z wywiadu przeprowadzonego przez autorkę.

[25] B. Greene, *Piękno wszechświata. Superstruny, ukryte wymiary i poszukiwanie teorii ostatecznej*, tłum. B. Bieniok, E.L. Łokas, Zysk i S-ka, Poznań 2018.

[26] E. Heisenberg, *Inner exile...*, op. cit., s. 144.

[27] E. Schrödinger, *Über das Verhältnis der Heisenberg-Bohr-Jordanschen Quantentheorie zu der meinen*, „Ann. Physik" 4(7): 734–756, 1926.

[28] W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.: Band 1: 1919–1929*, w: A. Hermann, K. v. Meyenn, V.F. Weisskopf (red.), *Sources in the History of Mathematics and Physical Sciences*, Springer, New York 1979, s. 262.

[29] G. Lemaître, *Rencontres avec A. Einstein*, „Revue des Questions Scientifiques" 129: 129–132, 1958, cyt. za: H. Nussbaumer, *Einstein's conversion from his static to an expanding universe*, „EPJH" 39: 37–62, 2014.

[30] Nekrolog, Professor Sir Fred Hoyle, „Telegraph", 22 sierpnia 2001, https://www.telegraph.co.uk/news/obituaries/1338125/Professor-Sir-Fred-Hoyle.html.

[31] A. Curtis, *A mile or two off Yarmouth*, blog *Adam Curtis: the Medium and the Message*, 24 lutego 2012, http://www.bbc.co.uk/blogs/adamcurtis/entries/512cde83-3afb-3048-9ece-dba774b10f89.

[32] Teoria wirów została omówiona w: H. Kragh, *The vortex atom: a Victorian theory of everything*, „Centaurus" 44: 32–114, 2002; idem, *Wielkie spekulacje. Teorie i nieudane rewolucje w fizyce i kosmologii*, tłum. T. Lanczewski, CCPress, Kraków 2016.

[33] O. Lodge, *The ether and its functions*, „Nature" 34: 304–306, 328–330, 1883, cyt. za: H. Kragh, *Wielkie spekulacje...*, op. cit., s. 99.

[34] A.A. Michelson, *Light waves and their uses*, University of Chicago Press, Chicago 1903, cyt. za: H. Kragh, *Wielkie spekulacje...*, op. cit., s. 99.

[35] J.C. Maxwell, *Atoms*, w: *Encyclopaedia Britannica*, wyd. 9, 1875, cyt. za: J.C. Maxwell, *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, t. 2, red. W.D. Niven, Cambridge University Press, Cambridge 2011, s. 592.

[36] H. Kragh, *Wielkie spekulacje...*, op. cit., s. 80.

[37] M.J. Klein, *Mechanical explanation at the end of the nineteenth century*, „Centaurus" 17: 72, 1973, cyt. za: J.W. McAllister, *Beauty and revolution...*, op. cit., s. 88.

[38] P.A.M. Dirac, *A new classical theory of electrons*, „Proc. R. Soc. Lond. A" 209: 251, 1951.

[39] Cyt. za: H. Kragh, *Dirac: a scientific...*, op. cit., s. 184.

[40] Tylko dwoje fizyków zdobyło Nagrodę Nobla dwukrotnie, i to głównie za pracę doświadczalną: Maria Skłodowska-Curie w 1903 roku za odkrycie promieniotwórczości i w 1911 roku za wyizolowanie czystego radu (druga nagroda była przyznana w dziedzinie chemii) oraz John Bardeen w 1956 roku za wynalezienie tranzystora i ponownie w 1972 roku, wspólnie z Leonem Cooperem i Johnem Schriefferem, za rozwiniętą przez nich teorię nadprzewodnictwa.

Niektórzy z moich kolegów przekonują, że Bardeen powinien być liczony jako fizyk teoretyk. Ukończył on jednak elektrotechnikę i obie zdobyte przez niego Nagrody Nobla dotyczyły nauki stosowanej, więc moim zdaniem byłoby to dosyć naciągane. Ale ponieważ „fizyk teoretyk" nie jest ostro zdefiniowanym pojęciem, uważam również, że spieranie się o tę kwestię jest jałowe. Tak czy siak, nie ma to znaczenia dla mojej tezy. Osiągnięcia Bardeena z pewnością nie opierały się na argumentach z piękna i naturalności, a to ich dotyczy ta książka.

[41] R. Dawid, *String theory and the scientific method*, Cambridge University Press, Cambridge 2013.

[42] H. Kragh, *The vortex atom...*, op. cit.; idem, *Wielkie spekulacje...*, op. cit.

[43] G. Ellis, J. Silk, *Scientific method: Defend the integrity of physics*, „Nature" 516: 321–323, 2014.

[44] R. Dawid, *String theory...*, op. cit., tylne skrzydełko obwoluty.

[45] C.E.M. Wagner, *Lectures on supersymmetry (II)*, prezentacja w PowerPoincie, Fermilab, Batavia, 23 i 30 czerwca 2005, https://www-cdf.fnal.gov/physics/lectures/Wagner_Lecture2.pdf.

[46] L. Lederman, *The God particle et al.*, „Nature" 448: 310–312, 2007.

Rozdział 3. Stan państwa

[1] F.J. O'Brien, *Diamentowa soczewka*, tłum. A. Szpakowska, w: J. Gunn, *Droga do science-fiction*, cz. 1: *Od Gilgamesza do Wellsa*, red. W. Bukato, Alfa, Warszawa 1985.

[2] Ściśle rzecz biorąc, to nie tyle bozon Higgsa nadaje masę cząstkom elementarnym, ile niezerowa wartość pola Higgsa. Co więcej, masy cząstek złożonych, jak neutrony i protony, w większości pochodzą od energii wiązania, a nie od pola Higgsa.

[3] S. Glashow, *Interactions: a journey through the mind of a particle physicist and the matter of this world*, Warner Books, New York 1988.

[4] Świetny materiał przeglądowy na temat techniki i rozwoju teleskopów można znaleźć w: F. Graham-Smith, *Eyes on the sky: a spectrum of telescopes*, Oxford University Press, Oxford 2016.

[5] Bodaj najbardziej niesamowitym przykładem jest Ultragłębokie Pole Hubble'a. Por. S.V.W. Beckwith et al., *The Hubble Ultra Deep Field*, „Astron. J." 132: 1729–1755, 2006, arXiv:astro-ph/0607632. Albo wpisz w wyszukiwarkę obrazów Google'a hasło „Hubble Ultra Deep Field".

[6] Temperatura 10^{17} kelwinów to właściwie tyle samo co 10^{17} stopni Celsjusza czy Fahrenheita.

[7] Można by długo opowiadać o standardowym modelu kosmologicznym i jego rozwoju, ale nie chcę odchodzić zbyt daleko od głównego wątku. Szczegóły można znaleźć w: E. Gates, *Teleskop Einsteina: W poszukiwaniu ciemnej materii i ciemnej energii we Wszechświecie*, tłum. T. Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010; E. Siegel, *Beyond the Galaxy: how humanity looked beyond our Milky Way and discovered the entire universe*, World Scientific Publishing, Hackensack 2015.

[8] Dlaczego czasem używamy terminu „model", a czasem „teoria"? Nie ma tu ścisłych reguł nazewnictwa; jedne nazwy się przyjmują, inne nie. Ale z grubsza rzecz biorąc, teoria stanowi ogólny formalizm matematyczny, podczas gdy model zawiera wszystkie szczegóły potrzebne do obliczeń. Przykładowo, istnieje wiele różnych kwantowych teorii pola, a przez model standardowy rozumie się jedną z nich, konkretną. Podobnie ogólna teoria względności sama w sobie nie mówi jeszcze, co obliczać; w tym celu trzeba ustalić, jaki rodzaj materii i energii wypełnia czasoprzestrzeń, a tym zajmuje się już standardowy model kosmologiczny.

[9] X. Portell, *SUSY searches at the Tevatron and the LHC*, referat wygłoszony na międzynarodowym sympozjum „Physics in Collision", Vancouver, Kanada, sierpień–wrzesień 2011, slajd 41, https://indico.cern.ch/event/117880/contributions/1330772/attachments/58548/84276/portell_SUSYsearches.pdf.

[10] B. Allanach, *Hint of new particle at CERN's Large Hadron Collider?*, „Guardian", 16 grudnia 2015.

[11] Cyt. za: A. Cho, *Physicists's nightmare scenario: the Higgs and nothing else*, „Science" 315: 1657–1658, 2007.

[12] D. Gross, *Closing remarks*, referat wygłoszony na konferencji „Strings 2013", Sogang University, Seul, Korea Południowa, 24–29 czerwca 2013, https://www.youtube.com/embed/vtXAwk1vkmk.

Rozdział 4. Pęknięcia w fundamentach

[1] M. Kaku, *Hiperprzestrzeń. Wszechświaty równoległe, pętle czasowe i dziesiąty wymiar*, tłum E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012, s. 165; S. Hawking, *Gödel and the end of the universe*, wykład popularnonaukowy, Cambridge, Wielka Brytania, 20 lipca 2002; M. Strassler, *Looking beyond the standard model*, wykład w ramach „Higgs Symposium", Uniwersytet Edynburski, Edynburg, Szkocja, 9–11 stycznia 2013, https://higgs.ph.ed.ac.uk/sites/default/files/Strassler_Looking_Beyond_SM.pdf; B. Greene, *Piękno Wszechświata. Superstruny, ukryte wymiary i poszukiwanie teorii ostatecznej*, tłum. B. Bieniok, E.L. Łokas, Zysk i S-ka, Poznań 2018, s. 211; P. Davies, *Kosmiczna wygrana. Dlaczego Wszechświat sprzyja życiu?*, tłum. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008, s. 116.

[2] Y. Koide, *Should the renewed tau mass value 1777 MeV be taken seriously?*, „Mod. Phys. Lett. A" 8: 2071, 1993.

[3] Ściśle rzecz biorąc, macierze mieszania zawierają nie tyle same prawdopodobieństwa, ile ich amplitudy. Istnieje jedna taka macierz dla neutrin oraz jedna dla kwarków dolnego, dziwnego i niskiego. Tę drugą nazywa się macierzą Cabibbo–Kobayashiego–Maskawy (CKM). [A tę pierwszą – macierzą Makiego–Nakagawy–Sakaty, w skrócie macierzą MNS – przyp. tłum.].

[4] R.D. Peccei, H.R. Quinn, *CP conservation in the presence of pseudoparticles*, „Phys. Rev. Lett." 38(25): 1440–1443, 1977.

[5] T. Brahe, *Astronomiae instauratae progymnasmata*, 1602, cyt. za: A. Blair, *Tycho Brahe's critique of Copernicus and the Copernican system*, „Journal of the History of Ideas" 51(3): 364, 1990.

[6] Istnieje na ten temat dobra praca przeglądowa: J.D. Barrow, *The lore of large numbers: some historical background to the anthropic principle*, „Q. Jl R. Astr. Soc." 22: 388–420, 1981.

[7] W żargonie znaczy to tyle, że współczynniki powinny być bliskie 1. [Oryginalny cytat pochodzi z: P.A.M. Dirac, *A new basis for cosmology*, „Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Sci." 165: 199–208, 1938 – przyp. tłum.].

[8] G. Steigman, *A crucial test of the Dirac cosmologies*, „ApJ" 221: 407–411, 1978.

[9] Aczkolwiek zrozumiano to dopiero wtedy, gdy fizycy nauczyli się radzić sobie z niegroźnymi nieskończonościami kwantowych teorii pola.

[10] Taka definicja technicznej naturalności pochodzi od Gerarda 't Hoofta, który zapostulował, że ilekroć w kwantowej teorii pola pojawia się podejrzanie mały parametr, musi istnieć pewna niezachowana symetria, która zostałaby przywrócona w wyniku wyzerowania tego parametru, i dlatego parametr ten musi mieć małą, ale niezerową wartość. Definicja ta została uogólniona i obecnie żąda się dla małych liczb *jakiegoś* wyjaśnienia – nie musi być nim symetria. Por. G. 't Hooft et al., *Recent developments in gauge theories*, Plenum Press, New York 1980, s. 135.

[11] S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani, *Weak interactions with lepton-hadron symmetry*, „Phys. Rev." 2(7): 1285–1292, 1970.

[12] S. Nadis, S.-T. Yau, *From the Great Wall to the great collider: China and the quest to uncover the inner workings of the universe*, International Press of Boston, Somerville 2015, s. 75.

[13] L. Randall, *Ukryte wymiary Wszechświata*, tłum. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2011, s. 300.

[14] Z wywiadu przeprowadzonego przez autorkę.

[15] Gluino to jedna z cząstek supersymetrycznych, superpartner gluonu z modelu standardowego.

[16] K.D. Thomas, *Beyond the Higgs: from LHC to China*, The Institute Letter, lato 2015, Institute for Advanced Study, Princeton, s. 8.

[1] R.F. Voss, J. Clarke, *'1/f noise' in music and speech*, „Nature" 258: 317–318, 1975.

[2] Oczywiście Bach nie zaczął komponować w momencie Wielkiego Wybuchu, a ludzie są w stanie usłyszeć tylko niewielki wycinek częstotliwości. Mówiąc, że w muzyce mamy do czynienia z korelacjami we „wszystkich" skalach czasowych, mamy na myśli tylko te, które mieszczą się w obrębie utworu i w zakresie słyszalnych częstotliwości. Rzeczywista muzyka nie odznacza się więc idealnym widmem typu 1/*f*, lecz jedynie przybliża je w pewnym zakresie. Mimo to odkryta uniwersalność jest ciekawym spostrzeżeniem.

[3] Nie mylić z dziedziną filozofii o tej samej nazwie – nazwa to jedyna rzecz, która je łączy.

[4] Cyt. za: H. Kragh, *Wielkie spekulacje. Teorie i nieudane rewolucje w fizyce i kosmologii*, tłum. T. Lanczewski, CCPress, Kraków 2016, s. 312.

[5] S. Weinberg, *To explain the world: the discovery of modern science*, Harper, New York 2015.

[6] N. Wolchover, P. Byrne, *How to check if your universe exists*, „Quanta Magazine", 11 lipca 2014.

[7] P. Davies, *Universes galore: where will it all end?*, w: B. Carr (red.), *Universe or multiverse*, Cambridge University Press, Cambridge 2007, s. 495.

[8] G. Ellis, *Żyjemy w Wieloświecie?*, „Świat Nauki" 09, 2011.

[9] *Lawrence Krauss owned by David Gross on the multiverse religion*, film na YouTube opublikowany 26 czerwca 2014, http://www.youtube.com/watch?v=fEx5rWfz2ow.

[10] P. Wells, *Perimeter Institute and the crisis in modern physics*, „MacLean's", 5 września 2013.

[11] J. Horgan, *Is speculation in multiverses as immoral as speculation in subprime mortgages?*, blog *Cross-check*, „Scientific American", 28 stycznia 2011, https://blogs.scientificamerican.com/cross-check/is-speculation-in-multiverses-as-immoral-as-speculation-in-subprime-mortgages/.

[12] A. Gefter, *Is string theory in trouble?*, „New Scientist", 14 grudnia 2005.

[13] B. Carr, *Defending the multiverse*, „Astronomy & Geophysics" 49(2): 2.36–2.37, 2008.

[14] C.F. Naff, *Cosmic quest: an interview with physicist Max Tegmark*, „TheHumanist.com", 8 maja 2014.

[15] T. Siegfried, *Belief in multiverse requires exceptional vision*, „ScienceNews.org", 14 sierpnia 2013.

[16] Wieczna inflacja została po raz pierwszy zaproponowana w roku 1983 przez Paula Steinhardta i Alexandra Vilenkina. Kilka lat później z innym modelem wyszli Alan Guth i Andrei Linde.

[17] Por. np. V. Mukhanov, *Inflation without selfreproduction*, „Fortschr. Phys." 63(1), 2015, arXiv:1409.2335 [astro-ph.CO].

[18] R. Bousso, L. Susskind, *The multiverse interpretation of quantum mechanics*, „Phys. Rev. D" 85: 045007, 2012, arXiv:1105.3796 [hep-th].

[19] M. Tegmark, *The mathematical universe*, „Found. Phys." 38: 101–150, 2008, arXiv:0704.0646 [gr-qc].

[20] J. Garriga, A. Vilenkin, J. Zhang, *Black holes and the multiverse*, „JCAP" 02: 064, 2016, arXiv:1512.01819 [hep-th].

[21] S. Weinberg, *Living in the multiverse*, referat na konferencji „Expectations of a Final Theory", Trinity College, Cambridge, Wielka Brytania, wrzesień 2005, arXiv:hep-th/0511037.

[22] W kontekście wieloświata zagadnienie to nosi nazwę „problemu miary". Por. np. A. Vilenkin, *Global structure of the multiverse and the measure problem*, „AIP Conf. Proc." 1514: 7, 2012, arXiv:1301.0121 [hep-th].

[23] F. Hoyle, *On nuclear reactions occurring in very hot stars. I. The synthesis of elements from carbon to nickel*, „Astrophys. J. Suppl. Ser." 1: 121, 1954.

[24] H. Kragh, *When is a prediction anthropic? Fred Hoyle and the 7.65 MeV carbon resonance*, preprint, http://philsci-archive.pitt.edu/5332.

[25] Por. np. J.D. Barrow, F.J. Tipler, *The anthropic cosmological principle*, Oxford University Press, Oxford 1986; P. Davies, *Kosmiczna wygrana. Dlaczego Wszechświat sprzyja życiu?*, tłum. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008.

[26] R.D. Harnik, G.D. Kribs, G. Perez, *A universe without weak interactions*, „Phys. Rev. D" 74: 035006, 2006, arXiv:hep-ph/0604027. [Odkrycie opisano również na łamach „Świata Nauki": A. Jenkins, G. Perez, *Na tropach życia w wieloświecie*, „Świat Nauki" 02, 2010 – przyp. tłum.].

[27] A. Loeb, *The habitable epoch of the early universe*, „Int. J. Astrobiol." 13(4): 337–339, 2014, arXiv:1312.0613 [astro-ph.CO].

[28] F.C. Adams, E. Grohs, *Stellar helium burning in other universes: a solution to the triple alpha fine-tuning problem*, 2016, arXiv:1608.04690 [astro-ph.CO].

[29] Nie zaskakuje mnie to. Spodziewam się, że to raczej reguła niż wyjątek, iż teorie z dziesiątkami nieliniowo oddziałujących składników prowadzą do powstawania złożonych struktur.

[30] Z tym stanowiskiem polemizuje Don Page, por. D.N. Page, *Preliminary inconclusive hint of evidence against optimal fine tuning of the cosmological constant for maximizing the fraction of baryons becoming life*, 2011, arXiv:1101.2444.

[31] H. Martel, P.R. Shapiro, S. Weinberg, *Likely values of the cosmological constant*, „Astrophys. J." 492: 29, 1998, arXiv:astro-ph/9701099.

[32] Pogłoski, że stała kosmologiczna nie jest zerowa, lecz dodatnia, krążyły wówczas już od dekady i opierały się na innych pomiarach, które jednak były dość niejednoznaczne. Por. np. G. Efstathiou, W.J. Sutherland, S.J. Maddox, *The cosmological constant and cold dark matter*, „Nature" 348: 705–707, 1990; L.M. Krauss, M.S. Turner, *The cosmological constant is back*, „Gen. Rel. Grav." 27: 1137–1144, 1995, arXiv:astro-ph/9504003. Weinberg zastanawiał się nad antropicznym wytłumaczeniem stałej kosmologicznej nawet wcześniej; por. S. Weinberg, *The cosmological constant problem*, „Rev. Mod. Phys." 61(1): 1–23, 1989.

[33] G. Johnson, *Dissonance: Schoenberg*, „New York Times", film zamieszczony 30 maja 2014, http://www.nytimes.com/video/arts/music/100000002837182/dissonance-schoenberg.html.

[34] J.H. McDermott, A.F. Schultz, E.A. Undurraga, R.A. Godoy, *Indifference to dissonance in native Amazonians reveals cultural variation in music perception*, „Nature" 535: 547–550, 2016.

Rozdział 6. Niepojęta pojmowalność mechaniki kwantowej

[1] Tytuł tego podrozdziału parafrazuje komika Louisa C.K., który powiedział „Wszystko obecnie jest niesamowite, a każdy narzeka". Por. *Louis CK Everything Is Amazing And Nobody Is Happy*, film na YouTube opublikowany 24 października 2015, https://www.youtube.com/watch?v=q8LaT5Iiwo4.

[2] S. Popescu, *Noncolality beyond quantum mechanics*, „Nature Physics" 10: 264–270, 2014.

[3] Cyt. za: N. Wolchover, *Have we been interpreting quantum mechanics wrong this whole time?*, „Wired", 30 czerwca 2014, https://www.wired.com/2014/06/the-new-quantum-reality/.

[4] S. Weinberg, *Lectures on quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 2012.

[5] T. Scheidl et al., *Violation of local realism with freedom of choice*, „Proc. Natl. Acad. Sci. USA" 107: 19708, 2010, arXiv:0811.3129 [quant-ph].

[6] Znakomitą lekturą dla zainteresowanych tą tematyką jest: G. Musser, *Upiorne działanie na odległość i jego wpływ na czarne dziury. Wielki Wybuch i teorię wszystkiego*, tłum. Ł. Lamża, CCPress, Kraków 2018.

[7] N.D. Mermin, *What's wrong with this pillow?*, „Physics Today", kwiecień 1989. I nie, tym, kto to powiedział, nie był Feynman; por. N.D. Mermin, *Could Feynman have said this?*, „Physics Today", maj 2004.

[8] L. Vaidman, *Time symmetry and the many worlds interpretation*, w: S. Saunders, J. Barrett, A. Kent, D. Wallace (red.), *Many worlds? Everett, quantum theory, and reality*, Oxford University Press, Oxford 2012, s. 582; M. Tegmark, *Wszechświaty równoległe*, „Świat Nauki" 06, 2003.

[9] N.D. Mermin, *Why quark rhymes with pork and other scientific diversions*, Cambridge University Press, Cambridge 2016; S. Carroll, *Why the many-worlds formulation of quantum mechanics is probably correct*, blog *Preposterous Universe*, 30 czerwca 2014, http://www.preposterousuniverse.com/blog/2014/06/30/why-the-many-worlds-formulation-of-quantum-mechanics-is-probably-correct/.

[10] Niektóre interpretacje sugerują z kolei, że warunki prowadzące do uzyskiwania takich samych rezultatów jak interpretacja kopenhaska mogą nie być zawsze spełnione, co zasadniczo umożliwiałoby ich eksperymentalne rozróżnienie. To się jednak jak dotąd nie stało.

[11] M. Bell, K. Gottfried, M. Veltman, *John S. Bell on the foundations of quantum mechanics*, World Scientific Publishing, River Edge 2001, s. 199.

[12] J. Polkinghorne, *Quantum Mechanics: a very short introduction*, Oxford University Press, Oxford 2002.

[13] M. Tegmark, *Nasz matematyczny Wszechświat. W poszukiwaniu prawdziwej natury rzeczywistości*, tłum. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015, s. 271; M. Tegmark, *Wszechświaty równoległe*, op. cit.

[14] A. Kent, *Our quantum problem*, „Aeon", 28 stycznia 2014, https://aeon.co/essays/what-really-happens-in-schrodinger-s-box.

[15] Wspominał mi, że pracuje nad artykułem na ten temat; ukazał się on dwa miesiące później. Por. S. Weinberg, *What happens in a measurement?*, „Phys. Rev. A" 93: 032124, 2016, arXiv:1603.06008 [quant-ph].

[16] To, że stan pozostaje „czysty", oznacza tyle, że nie ulega dekoherencji.

[17] C. Orzel, *Jak nauczyć fizyki swojego psa*, tłum. B. Fic, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012.

[18] Mowa o Williamie Danielu Phillipsie, który zdobył Nagrodę Nobla z fizyki w 1997 roku wspólnie z Claude'em Cohenem-Tannoudjim i Stevenem Chu za chłodzenie laserowe, technikę służącą do spowalniania atomów.

[19] A. Sparkes et al., *Towards robot scientists for autonomous scientific discovery*, „Automated Experimentation" 2: 1, 2010.

[20] M. Schmidt, H. Lipson, *Distilling free-form natural laws from experimental data*, „Science" 324: 81–85, 2009.

[21] M. Krenn, M. Malik, R. Fickler, R. Lapkiewicz, A. Zeilinger, *Automated search for new quantum experiments*, „Phys. Rev. Lett." 116: 090405, 2016.

[22] Cyt. za: P. Ball, *Focus: computer chooses quantum experiments*, „Physics" 9: 25, 2016.

[23] E. Powell, *Discover interview: Anton Zeilinger dangled from windows, teleported photons, and taught the Dalai Lama*, „Discover Magazine", lipiec–sierpień 2011.

[24] Grę można pobrać stąd: http://www.scienceathome.org/games/quantum-moves. [Powstał też już jej sequel: http://www.scienceathome.org/games/quantum-moves-2/ – przyp. tłum.].

[25] J.J.W.H. Sørensen et al., *Exploring the quantum speed limit with computer games*, „Nature" 532: 210–213, 2016.

[26] „Często dyskutowaliśmy o jego poglądach na temat obiektywnej rzeczywistości. Pamiętam, że na jednym ze spacerów Einstein nagle się zatrzymał, obrócił w moją stronę i spytał, czy naprawdę wierzę, że Księżyc istnieje tylko wtedy, kiedy na niego patrzę", w: A. Pais, *Einstein and the quantum theory*, „Rev. Mod. Phys." 51: 907, 1979.

[27] E.P. Wigner, *Niepojęta skuteczność matematyki w naukach przyrodniczych*, tłum. J. Dembek, „Zagad. Filozof. w Nauce" XIII, OBI, Kraków 1991, s. 5–18.

Rozdział 7. Jedna, by wszystkimi rządzić

[1] Patrz rozdział 2.

[2] D. Hooper, *Nature's blueprint*, Harper Collins, New York 2008, s. 193.

[3] D. Castelvecchi, *Is supersymmetry dead?*, „Scientific American", maj 2012.

[4] D. Gross, *Einstein and the search for unification*, „Current Science" 89(12): 25, 2005.

[5] Cyt. za: A. Cho, *Physicists's nightmare scenario: the Higgs and nothing else*, „Science" 315: 1657–1658, 2007.

[6] F. Wilczek, *Power over nature*, „Edge", 20 kwietnia 2016, https://www.edge.org/conversation/frank_wilczek-power-over-nature.

[7] J.W. McAllister, *Beauty and revolution in science*, Cornell University Press, Ithaca 1996.

[8] P.J. Mulvey, S. Nicholson, *Trends in physics PhDs*, „Focus On", luty 2014, AIP Statistical Research Center, College Park 2014.

[9] P. Forman, J.L. Heilbron, S. Weart, *Physics circa 1900*, w: R. McCormmach (red.), *Historical Studies in the Physical Sciences, Volume 5*, Princeton University Press, Princeton 1975.

[10] R. Sinatra et al., *A century of physics*, „Nature Physics" 11: 791–796, 2015.

[11] P.O. Larsen, M. von Ins, *The rate of growth in scientific publication and the decline in coverage provided by Science Citation Index*, „Scientometrics"

84(3): 575–603, 2010.

[12] R. Sinatra et al., *A century of physics*, op. cit.

[13] C.L. Palmer, M.H. Cragin, T.P. Hogan, *Information at the intersections of discovery: Case studies in neuroscience*, „Proceedings of the Association for Information Science and Technology" 41: 448–455, 2004.

[14] B. Uzzi, S. Mukherjee, M. Stringer, B. Jones, *Atypical combinations and scientific impact*, „Science" 342(6157): 468–472, 2013.

[15] R. Sinatra et al., *A century of physics*, op. cit.

[16] C. King, *Single-author papers: a waning share of output, but still providing the tools for progress*, „Science Watch", wrzesień 2013 (dostęp: styczeń 2016), http://sciencewatch.com/articles/single-author-papers-waning-share-output-still-providing-tools-progress.

[17] B. Maher, M.S. Anfres, *Young scientists under pressure: what the data show*, „Nature" 538: 44–45, 2016.

[18] T. von Hippel, C. von Hippel, *To apply or not to apply: a survey analysis of grant writing costs and benefits*, „PLoS One" 10(3): e0118494, 2015.

[19] J. Chubba, R. Watermeyer, *Artifice or integrity in the marketization of research impact? Investigating the moral economy of (pathways to) impact statements within research funding proposals in the UK and Australia*, „Studies in Higher Education" 42(12): 2360–2372, 2016.

[20] *Tenure* w kontekście akademickim oznacza umowę na czas nieokreślony, która nie może być rozwiązana bez bardzo dobrych powodów. Takimi powodami mogą być na przykład naruszenie prawa lub etyki zawodowej, ale już nie, dajmy na to, posiadanie irytującej opinii w jakiejś kwestii naukowej. Działa to podobnie w większości krajów. Zamysłem stojącym za systemem *tenure* jest (a może powinnam powiedzieć „była"?) ochrona uczonych przed ewentualnymi reperkusjami za prowadzenie niepopularnych lub kontrowersyjnych badań. Niekiedy napotykam osoby (głównie Amerykanów), zdaniem których taka gwarancja zatrudnienia jest niesprawiedliwym przywilejem akademików. To chybiona krytyka, albowiem bez takiej gwarancji w badaniach naukowych mielibyśmy do czynienia z wysokim ryzykiem marnowania pieniędzy podatników.

[21] S. Shulman, B. Hopkins, R. Kelchen, S. Mastracci, M. Yaya, J. Barnshaw, S. Dunietz, *Higher education at a crossroads: the economic value of tenure and*

the security of the profession, „Academe", marzec–kwiecień 2016, s. 9–23, https://www.aaup.org/sites/default/files/2015-16EconomicStatusReport.pdf.

[22] B. Brembs, *Booming university administrations*, „Björn.Brembs.Blog", 7 stycznia 2015, http://bjoern.brembs.net/2015/01/booming-university-administrations.

[23] J.G. Foster et al., *Tradition and innovation in scientists' research strategies*, „Am. Sociol. Rev." 80(5): 875–908, 2015.

[24] K. Weaver, S.M. Garcia, N. Schwarz, D.T. Miller, *Inferring the popularity of an opinion from its familiarity: a repetitive voice can sound like a chorus*, „J. Pers. Soc. Psychol." 92(5): 821–833, 2007.

[25] S. Odenwald, *The future of physics*, „Huffington Post", 26 stycznia 2015, https://www.huffingtonpost.com/dr-sten-odenwald/the-future-of-physics_b_6506304.html.

[26] J. Lykken, M. Spiropulu, *Supersymetria i kryzys w fizyce*, „Świat Nauki" 06, 2014.

[27] G.B. Khosrovshahi, *An Interview with Alain Connes*, http://www.freewebs.com/cvdegosson/connes-interview.pdf (dostęp: styczeń 2016).

[28] M. Kac, *Can one hear the shape of a drum?*, „Amer. Math. Monthly" 73(4): 1–23, 1966.

[29] A.H. Chamseddine, A. Connes, M. Marcolli, *Gravity and the standard model with neutrino mixing*, „Adv. Theor. Math. Phys." 11: 991–1089, 2007, arXiv:hep-th/0610241.

[30] A. Connes, *Irony, Noncommutative Geometry*, 4 sierpnia 2008, http://noncommutativegeometry.blogspot.de/2008/08/irony.html.

[31] A.H. Chamseddine, A. Connes, *Resilience of the spectral standard model*, „J. High Energy Phys." 1209: 104, 2012, arXiv:1208.1030 [hep-ph].

[32] A. Hebecker, W. Wetterich, *Spinor gravity*, „Phys. Lett. B" 574: 269–275, 2003, arXiv:hep-th/0307109; F. Finster, J. Kleiner, *Causal fermion systems as a candidate for a unified physical theory*, „J. Phys. Conf. Ser." 626: 012020, 2015, arXiv:1502.03587 [math-ph].

[33] O tej teorii z lat trzydziestych postulującej dodatkowe wymiary przestrzeni wspomnieliśmy krótko w rozdziale 1.

[34] A.G. Lisi, *An exceptionally simple theory of everything*, 2007, arXiv:0711.0770 [hep-th].

[35] A.G. Lisi, J.O. Weatherall, *Geometryczna Teoria Wszystkiego*, „Świat Nauki" 01, 2011.

Rozdział 8. Przestrzeń, ostateczna granica

[1] Nieistnienie duchów. [Nadmieńmy, że nie chodzi tu o bezcielesne istoty, ale o pewne specyficzne obiekty matematyczne o kłopotliwej interpretacji fizycznej – przyp. tłum.].

[2] S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, S.P. Trivedi, *De Sitter vacua in string theory*, „Phys. Rev. D" 68: 046005, 2003, arXiv:hep-th/0301240.

[3] S. Hossenfelder, *Whatever happened to AdS/CFT and the quark gluon plasma?*, blog *Backreaction*, 12 września 2013, http://backreaction.blogspot.com/2013/09/whatever-happened-to-adscft-and-quark.html.

[4] J. Conlon, *Why string theory?*, CRC Press, Boca Raton 2015, s. 135.

[5] F. Dyson, *Birds and frogs*, „Notices of the AMS" 56(2): 221, 2009.

[6] Cudowną książką o związkach strun z matematyką jest: S.-T. Yau, S. Nadis, *Geometria teorii strun. Ukryte wymiary przestrzeni*, tłum. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012.

[7] Szczegóły tej hipotezy, podane w niemalże strawny sposób, zainteresowany czytelnik znajdzie w: M. Ronan, *Symmetry and the monster: the story of one of the greatest quests of mathematics*, Oxford University Press, Oxford 2006.

[8] Na określenie tego związku często używa się ściślejszej nazwy „dualność AdS/CFT", która podkreśla, iż dotyczy ona teorii grawitacji w przestrzeni anty-de Sittera (AdS, pewna szczególna czasoprzestrzeń z ujemną stałą kosmologiczną), a pojawiająca się w niej teoria cechowania to (supersymetryczna) konforemna teoria pola (*conformal field theory*, CFT) w przestrzeni wymiaru mniejszego o jeden, podobna, lecz różniąca się od teorii składających się na model standardowy.

[9] J. Polchinski, *String theory to the rescue*, 2015, arXiv:1512.02477 [hep-th].

[10] Mowa o przekroju czynnym na rozpraszanie par bozonów W na sobie.

[11] J. Polchinski, *Monopoles, duality, and string theory*, „Int. J. Mod. Phys. A" 19S1: 145–156, 2004, arXiv:hep-th/0304042.

[12] Odwoływanie się do „informacji" jest tu nieco mylące, gdyż problem jako taki nie zależy od tego, co dokładnie rozumiemy przez informację. Zasadniczą przyczyną kłopotów jest fundamentalna nieodwracalność procesu parowania czarnych dziur.

[13] A. Almheiri, D. Marolf, J. Polchinski, J. Sully, *Black holes: complementarity or firewalls?*, „J. High Energy Phys." 2013(2): 62, 2013, arXiv:1207.3123 [hep-th]. A przynajmniej miały dowodzić – ich dowód opiera się na zbędnym, ukrytym założeniu, które można opuścić, sprawiając, że cały problem znika. Por. S. Hossenfelder, *Disentangling the black hole vacuum*, „Phys. Rev. D" 91: 044015, 2015, arXiv:1401.0288.

[14] Pozostałe trzy to śmierć, samotność i wolność. Por. I.D. Yalom, *Psychoterapia egzystencjalna*, Instytut Psychologii Zdrowia PTP, Warszawa 2013.

[15] A. Greene, *Stephen King: the Rolling Stone interview*, „Rolling Stone", 31 października 2014, https://www.rollingstone.com/culture/culture-features/stephen-king-the-rolling-stone-interview-191529/.

[16] J. Conlon, *Why string...*, op. cit., s. 236.

[17] E. Witten, *Viewpoints on string theory*, Nova: The Elegant Universe, PBS 2003, http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/viewpoints.html.

[18] L. Brink, M. Henneaux, *Principles of string theory*, Springer, Boston 1988.

[19] B. Greene, *Piękno Wszechświata. Superstruny, ukryte wymiary i poszukiwanie teorii ostatecznej*, tłum. B. Bieniok, E.L. Łokas, Zysk i S-ka, Poznań 2018, s. 204.

[20] Podejściem najmniej popularnym jest moje stwierdzenie, że próbujemy rozwiązać niewłaściwy problem – tym, co musimy zrozumieć, nie jest to, co dzieje się z grawitacją na małych odległościach, lecz to, co dzieje się tam z kwantyzacją. Por. S. Hossenfelder, *A possibility to solve the problems with quantizing gravity*, „Phys. Lett. B" 725: 473–476, 2013, arXiv:1208.5874 [gr-qc].

[21] Z. Cheng, X.-G. Wen, *Emergence of helicity +/− 2 modes (gravitons) from qubit models*, „Nucl. Phys. B" 863, 2012, arXiv:0907.1203 [gr-qc].

[22] To nie jedyny matematyczny problem z modelem standardowym lub ogólniej: z kwantowymi teoriami pól. Kolejny ma związek z twierdzeniem Haaga, które głosi, iż wszystkie kwantowe teorie pól są trywialne i fizycznie bezsensowne. Jest to cokolwiek niepokojące, toteż fizycy ignorują to twierdzenie.

Rozdział 9. Wszechświat, wszystko, co istnieje, i cała reszta

[1] C.H. Vinkers, J.K. Tijdink, W.M. Otte, *Use of positive and negative words in scientific PubMed abstracts between 1974 and 2014: retrospective analysis*, „BMJ" 351: h6467, 2015.

[2] W Stanach Zjednoczonych nierówność dochodowa w środowisku naukowym obecnie przewyższa tę w przemyśle i w sektorze rządowym. Por. C. Lok, *Science's 1%: how income inequality is getting worse in research*, „Nature" 537: 471–473, 2016.

[3] Co istotne, grozi to tym, że złe praktyki badawcze będą stawać się dominujące, nawet jeśli poszczególni naukowcy nic nie zmienią w swoim zachowaniu. Por. np. P.E. Smaldino, R. McElreath, *The natural selection of bad science*, „Royal Society Open Science" 3: 160384, 2016, arXiv:1605.09511 [physics.soc-ph].

[4] F. Hoyle, *Concluding remarks*, „Proc. Royal Soc. A" 301: 171, 1967. Hoyle relacjonuje też, że Baade skorzystał z okazji i założył się z Paulim, iż neutrino zostanie odkryte. Astronom wygrał wreszcie (szampana), gdy Cowen i Reines zdali raport z pomyślnej detekcji.

[5] K. Freese, *Cosmic cocktail: three parts dark matter*, Princeton University Press, Princeton 2014.

[6] J.L. Feng, *Collider physics and cosmology*, „Class. Quant. Grav." 25: 114003, 2008, arXiv:0801.1334 [gr-qc]; R.B. Buckley, L. Randall, *Xogenesis*, „J. High Energy Phys." 1109: 009, 2011, arXiv:1009.0270 [hep-ph].

[7] L. Baudis, *Dark matter searches*, „Ann. Phys." (Berlin) 528(1–2): 74–83, 2015, arXiv:1509.00869 [astro-ph.CO].

[8] M.W. Goodman, E. Witten, *Detectability of certain dark-matter candidates*, „Phys. Rev. D". 31(12): 3059–3063, 1985.

[9] G. Gelmini, *Bounds on galactic cold dark matter particle candidates and solar axions from a Ge-spectrometer*, w: I. Hinchliffe (red.), *Proceedings of the theoretical workshop on cosmology and particle physics: July 28–Aug. 15, 1986, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California*, World Scientific, Singapur 1987.

[10] Eksperyment DAMA zarejestrował statystycznie istotne zdarzenia niewiadomego pochodzenia, których częstość zmienia się okresowo w ciągu roku (R. Bernabei, *First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI*, „Eur. Phys. J. C" 56: 333–355, 2008, arXiv:0804.2741 [astro-ph]). Obserwuje się je już od dekady. Modulacja rejestrowanego sygnału w cyklu rocznym jest spodziewanym efektem, albowiem prawdopodobieństwo detekcji cząstek ciemnej materii powinno zależeć od kierunku, z którego cząstki te nadlatują. Ponieważ Ziemia na swojej drodze dookoła Słońca przedziera się przez hipotetyczny obłok ciemnej materii, kierunek strumienia jej cząstek powinien się w ciągu roku zmieniać. Niestety inne eksperymenty wykluczyły możliwość, że sygnał obserwowany przez eksperyment DAMA pochodzi od ciemnej materii, bo gdyby tak było, powinien być widoczny także w pozostałych detektorach, a tak nie jest. Do dziś nie wiadomo, co takiego DAMA właściwie widzi.

[11] A. Benoit et al., *First results of the EDELWEISS WIMP search using a 320 g heat-and-ionization Ge detector*, „Phys. Lett. B" 513: 15–22, 2001, arXiv:astro-ph/0106094.

[12] Xenon100 Collaboration. *Limits on spin-dependent WIMP-nucleon cross sections from 225 live days of XENON100 data*, „Phys. Rev. Lett." 111: 021301, 2013, arXiv:1301.6620 [astro-ph.CO].

[13] Niektórzy eksperci nie zgadzają się ze stwierdzeniem, że zakres parametrów skutkujących cudem WIMP został już wykluczony, i twierdzą, iż pewne fragmenty tego zakresu wciąż są dopuszczalne. Spór bierze się stąd, że nie istnieje tylko jeden model WIMP-ów, lecz wiele. Pierwotnie WIMP-y miały oddziaływać za pośrednictwem bozonów słabych i klasyfikowano je za pomocą pewnej szczególnej grupy symetrii. Ten wariant został wykluczony, ale modele z innymi cząstkami lub takie, w których oddziaływanie odbywa się inaczej, są wciąż zgodne z danymi obserwacyjnymi.

[14] O ile produkcja aksjonów ma miejsce przed inflacją. Jeśli dochodzi do niej dopiero po zakończeniu inflacji, gęstość kondensatu mogłaby co prawda osiągnąć wymaganą wartość, ale sam kondensat tworzyłby patchwork obszarów zwanych „domenami" poprzedzielanych „ścianami". Gęstość energii

w ścianach domenowych byłaby tak wielka, że nie daje się to pogodzić z obserwacjami.

[15] M. Milgrom, *A modification of the Newtonian dynamics – implications for galaxies*, „Astrophys. J." 270: 371, 1983.

[16] Por. np. J.W. Moffat, S. Rahvar, *The MOG weak field approximation and observational test of galaxy rotation curves*, „Mon. Notices Royal Astron. Soc." 436: 1439, 2013, arXiv:1306.6383 [astroph.GA]. Patrz również inne artykuły powyższych autorów.

[17] L. Berezhiani, J. Khoury, *Theory of dark matter superfluidity*, „Phys. Rev. D" 92: 103510, 2015, arXiv:1507.01019 [astro-ph.CO]. Podobna idea została wcześniej wysunięta w: J.P. Bruneton, S. Liberati, L. Sindoni, B. Famaey, *Reconciling MOND and dark matter?*, „JCAP" 3: 21, 2009, arXiv:0811.3143 [astro-ph].

[18] Obecnie podawana wartość stałej kosmologicznej Λ to około $10^{-52}/\mathrm{m}^2$. Fizycy cząstek mają jednak na myśli co innego, gdy mówią o skali CC. Mianowicie wychodzą od związanej ze stałą kosmologiczną gęstości energii, wyrażającej się wzorem $c^4\Lambda/G$ (gdzie G to stała grawitacji Newtona, natomiast c oznacza prędkość światła), mnożą ją przez $\hbar^3$ (sześcian zredukowanej stałej Plancka) i z tak otrzymanej wielkości wyciągają pierwiastek stopnia czwartego, co daje $10^4/\mathrm{m}$. Biorąc odwrotność tej liczby, otrzymujemy skalę odległości na poziomie 1/10 mm. To około 30 rzędów wielkości więcej niż długość Plancka (por. rysunek 14). W terminach gęstości energii rozziew między skalą Plancka a skalą CC wymaga podniesienia powyższego rezultatu do czwartej potęgi, skąd wynika częściej podawana, choć nieco myląca, różnica 120 rzędów wielkości.

[19] L.A. Boyle, P.J. Steinhardt, N. Turok, *Inflationary predictions for scalar and tensor fluctuations reconsidered*, „Phys. Rev. Lett." 96: 111301, 2006, arXiv:astro-ph/0507455.

[20] Mowa o gaussowskości oraz korelacjach temperatury-polaryzacji (TE), by wymienić te najistotniejsze.

[21] J. Martin, C. Ringeval, R. Trotta, V. Vennin, *The best inflationary models after Planck*, „JCAP" 1403: 039, 2014, arXiv:1312.3529 [astro-ph.CO].

[22] F. Azhar, J. Butterfield, *Scientific realism and primordial cosmology*, w: J. Saatsi (red.), *The Routledge handbook of scientific realism*, Routledge, New York 2017, arXiv:1606.04071 [physics.hist-ph].

[23] J. Silk, *The dark side of the universe*, „Astron. Geophys." 48(2): 2.30–2.38, 2007.

[24] Cyt. za: A. Ijjas, P.J. Steinhardt, A. Loeb, *Kłopoty kosmicznej inflacji*, „Świat Nauki" 03, 2017.

[25] S.W. Hawking, G.F.R. Ellis, *The large scale structure of space-time*, Cambridge University Press, Cambridge 1973.

[26] G.F.R. Ellis, *Cosmology and verifiability*, „QJRAS" 16: 245–264, 1975.

[27] S. Stepnes, *Detector challenges at the LHC*, „Nature" 448: 290–296, 2007.

[28] G.F.R. Ellis, G.B. Brundrit, *Life in the infinite universe*, „QJRAS" 20: 37–41, 1979.

[29] D. Hilbert, *Über das Unendliche*, „Mathematische Annalen" 95, Springer, Berlin 1926.

[30] L. Krauss, *The consolation of philosophy*, „Scientific American", 27 kwietnia 2012.

[31] S. Weinberg, *Sen o teorii ostatecznej*, tłum. P. Amsterdamski, Zysk i S-ka, Poznań 1997, s. 211.

[32] S. Hawking, L. Mlodinow, *Wielki projekt*, tłum. J. Włodarczyk, Albatros, Warszawa 2019, s. 9.

[33] M. Pigliucci, *Lawrence Krauss: another physicist with an anti-philosophy complex*, blog *Rationally Speaking*, 25 kwietnia 2012, http://rationallyspeaking.blogspot.de/2012/04/lawrence-krauss-another-physicist-with.html.

[34] T. Maudlin, *Why physics needs philosophy*, blog *The Nature of Reality*, 23 kwietnia 2015, PBS, http://www.pbs.org/wgbh/nova/blogs/physics/2015/04/physics-needs-philosophy/.

Rozdział 10. Wiedza to potęga

[1] D. Hooper, *Nature's blueprint*, Harper Collins, New York 2008, s. 5.

[2] B.T. Rutjens, S.J. Heine, *The immoral landscape? Scientists are associated with violations of morality*, „PLoS ONE" 11(4): e0152798, 2016.

[3] J.D. Watson, *Podwójna helisa. Historia odkrycia struktury DNA*, tłum. W. Zagórski, Prószyński i S-ka, Warszawa 1995, s. 160.

[4] P.A. Fleming, P.W. Bateman, *The good, the bad, and the ugly: which Australian terrestrial mammal species attract most research?*, „Mammal Rev." 46(4): 241–254, 2016.

[5] „Zaryzykowałbym stwierdzenie, że główny powód, dla którego techniki statystyczne wykorzystujące szeregi czasowe nie są wykorzystywane w procesie tworzenia oficjalnych prognoz klimatycznych, ma związek z estetyką – kwestią, która, jak sądzę, rzadko pojawia się na zebraniach IPCC". D. Orrell, *Truth or beauty: science and the quest for order*, Yale University Press, New Haven 2012, s. 214.

[6] P. Krugman, *How did economists get it so wrong?*, „New York Times", 2 września 2009.

[7] Por. np. J.D. Farmer, J. Geanakoplos, *The virtues and vices of equilibrium and the future of financial economics*, 2008, arXiv:0803.2996 [q-fin.GN].

[8] Obecnie 3,8 σ. Por. A.T. Yue et al., *Improved determination of the neutron lifetime*, „Phys. Rev. Lett." 111: 222501, 2013, arXiv:1309.2623 [nucl-ex].

[9] C. Patrignani et al. (Particle Data Group), *Review of particle physics*, „Chin. Phys. C" 40: 100001, 2016.

[10] M. Baker, *1,500 scientists lift the lid on reproducibility*, „Nature" 533: 452–454, 2016.

[11] Moim zdaniem paradoks ściany ognia opiera się po prostu na błędnym dowodzie. Por. S. Hossenfelder, *Disentangling the black hole vacuum*, „Phys. Rev. D" 91: 044015, 2015, arXiv:1401.0288. Jednak bez względu na jego status ciekawie jest przyjrzeć się wnioskom, do jakich doszli moi koledzy w związku z tym paradoksem.

[12] J. Maldacena, L. Susskind, *Cool horizons for entangled black holes*, „Fortschr. Physik" 61(9): 781–811, 2013, arXiv:1306.0533 [hep-th].

[13] Tunele czasoprzestrzenne nazywa się także mostami Einsteina–Rosena (ER), natomiast pary cząstek splątanych określa się niekiedy mianem stanów EPR, albowiem po raz pierwszy były one rozważane przez Einsteina, Podolskiego i Rosena (A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, „Phys. Rev." 47: 777, 1935). Z tego powodu hipoteza, w myśl której obie struktury

teoretyczne reprezentują to samo zjawisko, zaczęła funkcjonować w literaturze pod nazwą „ER = EPR”.

[14] Więcej na ten temat w: M.R. Banaji, A.G. Greenwald, *Blindspot: hidden biases of good people*, Delacorte, New York 2013; D. Kahneman, *Pułapki myślenia. O myśleniu szybkim i wolnym*, tłum. P. Szymczak, Media Rodzina, Poznań 2012.

[15] E. Balcetis, *Where the motivation resides and self-deception hides: how motivated cognition accomplishes self-deception*, „Social and Personality Psychology Compass” 2(1): 361–381, 2008.

[16] No dobra, nie to dokładnie powiedział – jest to szeroko rozpowszechniona parafraza następującego cytatu: „Nowa prawda naukowa nie odnosi triumfu dzięki temu, że udaje się jej przekonać przeciwników i sprawić, aby dojrzeli światło, lecz raczej wskutek tego, że oponenci wymierają i wzrasta nowe pokolenie dobrze z nią obeznanych badaczy”. Por. M. Planck, *Wissenschaftliche Selbstbiographie. Mit einem Bildnis und der von Max von Laue gehaltenen Traueransprache*, Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig 1948, s. 22, tłum. za: T. Kuhn, *Struktura rewolucji naukowych*, tłum. H. Ostrołęcka, Aletheia, Warszawa 2011.

[17] K.E. Stanovich, R.F. West, *On the relative independence of thinking biases and cognitive ability*, „J. Pers. Soc. Psychol.” 94(4): 672–695, 2008.

[18] M.G. Cruz, F.J. Boster, J.I. Rodriguez, *The impact of group size and proportion of shared information on the exchange and integration of information in groups*, „Communic. Res.” 24(3): 291–313, 1997.

[19] N. Wolchover, *Supersymmetry bet settled with cognac*, „Quanta Magazine”, 22 sierpnia 2016.

Dodatek A. Cząstki modelu standardowego

[1] Istnieje wiele znakomitych książek o modelu standardowym i akceleratorach cząstek, które omawiają te zagadnienia znacznie bardziej szczegółowo, niż było to dla mnie konieczne. By wymienić tylko dwie niedawno wydane: S. Carroll, *Cząstka na końcu Wszechświata. Bozon Higgsa i nowa wizja rzeczywistości*, tłum. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2014; J. Moffat, *Cracking the particle code of the universe: the hunt for the Higgs boson*, Oxford University Press, Oxford 2014.

[2] O. Eberhart et al., *Impact of a Higgs boson at a mass of 126 GeV on the standard model with three and four fermion generations*, „Phys. Rev. Lett.” 109: 241802, 2012, arXiv:1209.1101 [hep-ph].

Dodatek B. Kłopoty z naturalnością

[1] Fizycy pokładają ufność w separacji skal częściowo za sprawą artykułu z 1975 roku, w którym udowodniono tego typu rozprzęganie w kwantowych teoriach pola spełniających pewne warunki. Dowód opiera się jednak na renormalizowalności i posługuje się schematem renormalizacji zależnym od masy, a oba te założenia są dyskusyjne. Por. T. Appelquist, J. Carazzone, *Infrared singularities and massive fields*, „Phys. Rev. D” 11: 28565, 1975.

[2] G. Anderson, D. Castano, *Measures of fine tuning*, „Phys. Lett. B” 347: 300–308, 1995, arXiv:hep-ph/9409419.

[3] Więcej szczegółów można znaleźć w: S. Hossenfelder, *Screams for explanation: finetuning and naturalness in the foundations of physics*, 2018, arXiv:1801.02176.

[1*] Obecna pełna nazwa CERN-u brzmi: Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. Podaną przez autorkę pierwotną nazwę zmieniono już w 1954 roku, pozostając jednak przy oryginalnym skrótowcu [przyp. tłum.; jeśli nie zaznaczono inaczej, przypisy pochodzą od autorki].

[2*] A także całe jądra atomowe [przyp. tłum.].

[3*] Skrót „eV" oznacza „elektronowolt". Jest to jednostka energii. TeV stanowi 10^{12} (czyli bilion) eV. LHC może maksymalnie zapewnić energię zderzeń około 14 TeV. Dlatego mówi się, że LHC pracuje w skali TeV. [Inne często spotykane wielokrotności elektronowolta to MeV (10^6, czyli milion, eV) oraz GeV (10^9, czyli miliard, eV) – przyp. tłum.]

[4*] Kepler był gorliwym zwolennikiem teorii Kopernika [przyp. tłum.].

[5*] Cytat w takiej formie pojawia się w: M. Wertheim, *Pythagoras' Trousers: God, Physics and the Gender Wars*, W. W. Norton & Company, New York 1997. Prawdopodobnie stanowi parafrazę stwierdzenia Keplera, że „najdoskonalszemu Stwórcy musiało zależeć na dokonaniu dzieła najidealniejszego" (cyt. za: J. Kepler, *Tajemnica Kosmosu*, przeł. M. Skrzypczak, E. Zakrzewska-Gębka, De Agostini, Warszawa 2003) [przyp. tłum.].

[6*] Ta część cytatu w rzeczywistości pochodzi od Leibniza. Jest to parafraza zdania, które bibliotekarz z Hanoweru zapisał prawdopodobnie w 1671 roku. Por. H. Breger, *God and Mathematics in Leibniz's Thought*, w: T. Koetsier, L. Bergmans (red.), *Mathematics and the Divine: A Historical Study*, Elsevier, Amsterdam 2005, s. 493, przekład własny [przyp. tłum.].

[7*] O roli obserwacji i eksperymentu Einstein wspomina choćby w pominiętym w tekście fragmencie cytatu: „Owszem, doświadczenie może nam podsuwać użyteczne pojęcia matematyczne, lecz w żadnym przypadku pojęć tych nie można jednak wysnuć z doświadczenia. Rzecz naturalna, pozostaje ono nadal dla fizyki jedynym sprawdzianem użyteczności wszelkiej konstrukcji matematycznej. Właściwa zasada twórcza znajduje się jednak w matematyce" (A. Einstein, *O metodzie fizyki teoretycznej*, w: *Jak wyobrażam sobie świat*, tłum. T. Lanczewski, CCPress, Kraków 2017) [przyp. tłum.].

[8*] To podwałbrzyskie wzgórze obecnie znane jest jako góra Barbarka [przyp. tłum.].

[9*] Ściśle rzecz biorąc, z kwarka i antykwarka [przyp. tłum.].

[10*] Sama nazwa „Wielki Wybuch” nie pochodzi od Lemaître’a, ale od jego naukowego adwersarza, Freda Hoyle’a, o którym za chwilę [przyp. tłum.].

[11*] Pełna nazwa konferencji brzmiała *Why Trust a Theory? Reconsidering Scientific Methodology in Light of Modern Physics* [Dlaczego ufać teorii? Rewidując metodologię naukową w świetle fizyki współczesnej] [przyp. tłum.].

[12*] Szybkie przypomnienie: 10 do potęgi *x* to liczba zaczynająca się od cyfry 1, po której następuje *x* zer. Zatem przykładowo $10^2 = 100$.

[13*] „Precyzyjne dostrojenie” ma nieco inne znaczenie w kosmologii. Wrócimy do tego później.

[14*] Chodzi tu oczywiście o różnice względne [przyp. tłum.].

[15*] Teoria falsyfikowalna to taka, która przynajmniej w zasadzie daje się obalić, czyli sfalsyfikować. Popper argumentował, że stwierdzenia zasługują na miano naukowych tylko wtedy, gdy istnieje logicznie możliwy eksperyment zdolny im zaprzeczyć. Jak pisał, system naukowy musi mieć „taką formę logiczną, aby testy empiryczne pozwalały na decyzję w sensie negatywnym: *musi być możliwe obalenie empirycznego systemu naukowego przez doświadczenie*”, cyt. za: K. Popper, *Logika odkrycia naukowego*, tłum. U. Niklas, Aletheia, Warszawa 2016 [przyp. tłum.].

[16*] Ze stwierdzeniem tym można polemizować. Przykładowo, jak sama autorka zauważa w rozdziale 2, w XIX wieku pole elektromagnetyczne było postrzegane przez pryzmat mechanicyzmu jako coś emergentnego. Sam Maxwell uważał, że jego równania elektrodynamiki są tylko efektywną teorią pewnej formy aktywności fundamentalnie mechanicznego ośrodka – eteru. Dopiero w XX wieku zaakceptowano fundamentalną naturę tego pola fizycznego, a powstanie elektrodynamiki kwantowej tylko tę zmianę przypieczętowało [przyp. tłum.].

[17*] Istnieje kilka różnych miar i trwają spory, która z nich jest najlepsza, ale dla dalszej części wywodu nie ma to znaczenia.

[18*] I odkrywa żyjącą w niej istotę, w której się zakochuje [przyp. tłum.].

[19*] 1 nanometr to 10^{-9}, czyli jedna miliardowa metra.

[20*] Przy najwyższych energiach fizycy nie strzelają cząstkami do tarcz, tylko po prostu zderzają ze sobą dwie wiązki cząstek. W ten sposób uzyskuje się czystsze sygnały, a także osiąga się większą całkowitą energię zderzenia.

[21*] To wszystko, co musimy wiedzieć o szczególnej teorii względności na potrzeby tej książki, ale to z całą pewnością nie wszystko, co jest o niej do powiedzenia. Chcącym poczytać więcej polecam książki: Chada Orzela *Jak nauczyć teorii względności swojego psa* (tłum. B. Fic, Prószyński i S-ka, Warszawa 2013) oraz Leonarda Susskinda i Arta Friedmana *Szczególna teoria względności i klasyczna teoria pola. Teoretyczne minimum* (tłum. A. Skalski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2019).

[22*] W oryginale stosowana jest nazwa „concordance model", którą można by przetłumaczyć jako „model zgodnościowy". Autorka wspomina w przypisie, że co prawda mówi się też o „the standard model of cosmology", ale jej zdaniem może to prowadzić do pomyłek z modelem standardowym cząstek elementarnych. Ponieważ jednak w polskiej nomenklaturze powszechnie używa się właśnie nazwy „standardowy model kosmologiczny", to nią posługuję się w tłumaczeniu [przyp. tłum.].

[23*] Frank Wilczek faktycznie przyznał wprost, że urzekła go nazwa „Axion" krzycząca z wystawy w supermarkecie (a którą być może zaczerpnięto z mitologii greckiej). Wspomina przy tym, że Weinberg wymyślił dla tej cząstki nazwę „Higglet", co można by przetłumaczyć jako „Higgsiątko", ale na szczęście nie upierał się przy swoim pomyśle. Por. F. Wilczek, *Time's (Almost) Reversible Arrow,* Quanta Magazine, 7 stycznia 2016, https://www.quantamagazine.org/how-axions-may-explain-times-arrow-20160107/ [przyp. tłum.].

[24*] Pełne wyjaśnienie na gruncie falowej teorii światła podał dopiero George Biddell Airy w 1835 roku, aczkolwiek z pozorności tarcz gwiazd widzianych przez teleskopy zdawali sobie sprawę już niektórzy osiemnastowieczni astronomowie, tacy jak Edmund Halley i William Herschel. Por. C.M. Graney, T.P. Grayson, *On the Telescopic Disks of Stars: A Review and Analysis of Stellar Observations from the Early Seventeenth through the Middle Nineteenth Centuries*, „Ann. Sci." 68: 3, 2011, s. 351–373 [przyp. tłum.].

[25*] Akcelerator LEP ruszył w 1989 roku. W połowie lat dziewięćdziesiątych dokonano w nim gruntownych ulepszeń i kontynuowano badania aż do roku 2000. Nazwa LEP 1 odnosi się do maszyny przed modernizacją, LEP 2 – po niej [przyp. tłum.].

[26*] Matematyczny żarcik. Mając daną dostatecznie „porządną" funkcję na liczbach rzeczywistych, możemy ją jednoznacznie rozszerzyć na całą płaszczyznę zespoloną. Takie rozszerzenie nazywa się „przedłużeniem

analitycznym” naszej funkcji. Chodzi więc o dalsze zajmowanie się tym, co robiło się do tej pory.

[27*] Ściśle rzecz biorąc, Voss i Clarke poddali analizie fourierowskiej zależność głośności od czasu oraz zależność wysokości dźwięku od czasu (czyli *melodię*) dla różnych utworów muzycznych [przyp. tłum.].

[28*] Jest to jeden z wielu cytatów błędnie przypisywanych Einsteinowi. W swoim imponującym kompendium *Einstein w cytatach* (tłum. M. Krośniak, Poltext, Warszawa 2014) Alice Calaprice stawia wszakże tezę, że ów cytat może być daleko idącą parafrazą następującego fragmentu jednego z wykładów Einsteina: „Trudno zaprzeczyć, że nadrzędnym celem każdej teorii jest uzyskanie jak najmniejszej liczby jak najprostszych elementów bez konieczności rezygnacji z adekwatnego odzwierciedlenia choćby jednej danej empirycznej”. Zauważmy, że zdanie to współgra z resztą akapitu [przyp. tłum.].

[29*] Ściśle rzecz biorąc, funkcja ta musi być jeszcze nieujemna [przyp. tłum.].

[30*] Nieco bardziej techniczną wersję tego argumentu można znaleźć w Dodatku B.

[31*] Czyli nonilion [przyp. tłum.].

[32*] Chodzi o książkę pod tytułem *To Explain the World: The Discovery of Modern Science*, która ukazała się w 2015 roku i jak dotąd nie została wydana w Polsce [przy. tłum.].

[33*] Leptony to te fermiony modelu standardowego, które nie są kwarkami. [Ścisła definicja leptonu głosi, że są to fermiony, które nie oddziałują silnie z innymi cząstkami – przyp. tłum.].

[34*] Tym razem to autorka posługuje się tytułem książki Weinberga; i tym razem chodzi o książkę, którą wydano w Polsce: S. Weinberg, *Sen o teorii ostatecznej*, tłum. P. Amsterdamski, Zysk i S-ka, Poznań 1997 [przyp. tłum.].

[35*] Nazwa ta odnosi się zarówno do samego pola, jak i do związanej z nim cząstki [przyp. tłum.].

[36*] Newton nie zmierzył stałej grawitacyjnej, lecz jedynie ją z grubsza oszacował. Pierwszego dokładnego pomiaru dokonał dopiero Henry Cavendish w roku 1798, siedemdziesiąt jeden lat po śmierci Newtona [przyp. tłum.].

[37*] Mowa o anomalii dwufotonowej.

[38*] Najwyższy układ kart w pokerze, na który składają się dziesiątka, walet, dama, król i as tego samego koloru [przyp. tłum.].

[39*] Całkiem niedawno, bo raptem w 1998 roku.

[40*] Obserwabla to obserwowalna wielkość fizyczna, na przykład położenie, pęd, energia, a także polaryzacja fotonu, omawiana w dalszej części tego podrozdziału [przyp. tłum.].

[41*] Autorka jest tu w błędzie. Dla pary fotonów generowanych w omawianym eksperymencie kąt między kierunkami pomiaru polaryzacji w dwóch detektorach, przy którym wyniki będą nieskorelowane, wynosi nie 90, lecz 45 stopni. Z kolei miarą korelacji, czyli owej „częściowej informacji" uzyskanej z pomiaru jednego z fotonów na temat drugiego, jest, ściśle rzecz biorąc, *różnica* między prawdopodobieństwem uzyskania zgodnych wyników a prawdopodobieństwem uzyskania wyników przeciwnych [przyp. tłum.].

[42*] Mówiąc ściślej, angielski termin *QBism*, który wymawia się dokładnie tak samo jak *cubism* („kubizm"), jest skrótem od *quantum bayesianism* („bayesjanizm kwantowy"). Chcąc zachować odniesienie do stylu w sztuce, zdecydowałem się na tłumaczenie „QBizm" (*wym.* kubizm) [przyp. tłum.].

[43*] Czyli po prostu „Niepewne zasady", co jednak nie oddaje nawiązania oryginału do słynnej zasady nieoznaczoności Heisenberga (*Heisenberg's uncertainty principle*) [przyp. tłum.].

[44*] W jądrze atomowym danego pierwiastka znajduje się ustalona liczba protonów, ale liczba neutronów może być różna. Warianty tego samego pierwiastka różniące się liczbą neutronów nazywa się izotopami.

[45*] Ściślej: symetryczny stan dwucząstkowy [przyp. tłum.].

[46*] Pojawiła się praca kwestionująca ustalenia badaczy z Aarhus. Według Driesa Selsa z Uniwersytetu Harvarda pewien standardowy algorytm optymalizacyjny bez problemu osiąga w *Quantum Moves* lepsze wyniki niż ludzie, por. D. Sels, *Stochastic gradient ascent outperforms gamers in the Quantum Moves game*, „Phys. Rev. A" 97, 040302(R), 2018 [przyp. tłum.].

[47*] Autorka nawiązuje do słynnego prawa Clarke'a, głoszącego, iż „każda wystarczająco zaawansowana technologia jest nierozróżnialna od magii" [przyp. tłum.].

[48*] Mowa o słynnym eksperymencie przeprowadzonym po raz pierwszy przez Thomasa Younga w 1801 roku, który dowiódł falowej natury światła. Polegał

on na oświetleniu odpowiednio spreparowaną wiązką światła przesłony z dwiema cienkimi szczelinami i obserwowaniu obrazu powstającego na ekranie po drugiej stronie. Gdyby światło było strumieniem cząstek lecących prostoliniowo, na ekranie powinien być widoczny po prostu cień przesłony, czyli dwa jasne prążki odpowiadające szczelinom. Tymczasem prążków jest znacznie więcej, co można wyjaśnić, zakładając, że światło wypływa ze szczelin jako dwie fale, które gdzieniegdzie wzajemnie się wzmacniają, a gdzie indziej wygaszają. W 1927 roku, gdy rodziła się mechanika kwantowa, analogiczny eksperyment wykonano dla strumienia elektronów. Tu również zaobserwowano więcej prążków, co dowodziło, że cząstki elementarne (a przynajmniej elektron) także przejawiają naturę falową. Od tego czasu udało się pomyślnie przeprowadzić eksperyment z dwiema szczelinami nawet dla dużych molekuł liczących po około 500 protonów, neutronów i elektronów; por. S. Eibenberger, S. Gerlich, M. Arndt, M. Mayor, J. Tüxen, *Matter-wave interference with particles selected from a molecular library with masses exceeding 10000 amu*, „Phys. Chem. Chem. Phys.” 15, 2013, s. 14696–1470, arXiv:1310.8343 [quant-ph] [przyp. tłum.].

[49*] Angielskie słowo *element* oznacza zarówno „żywioł”, jak i „pierwiastek” [przyp. tłum.].

[50*] Po raz pierwszy wprowadzono je do teorii mniej więcej w tym samym czasie co oddziaływanie słabe – w pierwszej połowie lat trzydziestych XX wieku [przyp. tłum.].

[51*] Zwanej chromodynamiką kwantową [przyp. tłum.].

[52*] Parametr ten znany jest także jako „kąt Weinberga” [przyp. tłum.].

[53*] Mówiąc ściślej, wartość 3/8 dotyczy nie samego kąta, ale kwadratu jego sinusa [przyp. tłum.].

[54*] *Stomatopoda*, rząd morskich skorupiaków o niezwykle rozwiniętym zmyśle wzroku. W zależności od gatunku ich oczy są wyposażone w 12–16 rodzajów fotoreceptorów (u człowieka – ledwie 3), dzięki czemu widzą w ultrafiolecie i podczerwieni, a także rozróżniają polaryzację światła. W swoich wywiadach i publikacjach popularnonaukowych Wilczek często przywołuje te stworzenia jako ilustrację tego, jak ubogie jest nasze ludzkie postrzeganie świata (por. przypis 6) [przyp. tłum.].

[55*] „Disować” w slangu hiphopowym oznacza mniej więcej „krytykować, okazując pogardę” [przyp. tłum.].

[56*] Nawiązanie do sloganu „Science. It works, bitches”, ukutego w 2006 roku przez Randalla Munroe, autora internetowego komiksu *xkcd*, por. https://xkcd.com/54 [przyp. tłum.].

[57*] Por. J. Baggott, M. Duff, *A theory of everything... has physics gone too far?*, „Guardian”, 16 czerwca 2013, https://www.theguardian.com/science/2013/jun/16/has-physics-gone-too-far [przyp. tłum.].

[58*] Por. D. Hooper, *Nature's blueprint*, Harper Collins, New York 2008 [przyp. tłum.].

[59*] Jedna z najbardziej prestiżowych nagród w matematyce, nazywana (niezbyt trafnie) „matematycznym Noblem”. Przyznaje się ją co cztery lata dwojgu, trojgu lub czworgu uczonych nieprzekraczających czterdziestki. Alain Connes zdobył ją w 1982 roku [przyp. tłum.].

[60*] Nadmieńmy, iż przymiotnik „prosta” ma tu znaczenie ściśle matematyczne. W uproszczeniu chodzi o to, że prostej grupy Liego nie da się rozłożyć na mniejsze grupy. Mówiąc obrazowo, proste grupy Liego można metaforycznie nazwać „atomami” świata grup Liego, a wówczas klasyfikacja Killinga–Cartana będzie stanowiła swego rodzaju „układ okresowy pierwiastków” [przyp. tłum.].

[61*] „Działanie” to obiekt matematyczny, za pomocą którego fizycy cząstek definiują daną teorię.

[62*] Nazwa *monstrous moonshine*, oznaczająca dosłownie „monstrualną bujdę”, pochodzi od autorów rzeczonej hipotezy: matematyków J.H. Conwaya i S.P. Nortona [przyp. tłum.].

[63*] Mowa o tak zwanej skali Plancka, zaproponowanej w 1899 roku, która posługuje się jednostkami długości, czasu, energii i tak dalej, wyprowadzonymi wyłącznie przy użyciu stałych przyrody. Przykładowo, długość Plancka wynosi około 10^{-35} m, natomiast czas Plancka – około 10^{-44} s [przyp. tłum.].

[64*] Mowa o anomalii dwufotonowej.

[65*] W kwietniu 2019 roku astronomowie skupieni w projekcie Event Horizon Telescope [Teleskop Horyzontu Zdarzeń] opublikowali radioteleskopowy obraz supermasywnej czarnej dziury znajdującej się w centrum galaktyki M87, na którym najpewniej widać gaz krążący w bezpośredniej bliskości horyzontu

zdarzeń. Obraz ten stanowi kolejny, jeszcze silniejszy dowód na realność czarnych dziur [przyp. tłum.].

[66*] Dla matematyków i fizyków „dyskretny” (ang. *discrete*) oznacza tyle co „nieciągły, zbudowany z odrębnych elementów”. Choć niektórzy ubolewają nad tym, że słowo to w języku polskim posiada już zupełnie inne znaczenie (odpowiadające ang. *discreet*), w swoim naukowym znaczeniu jest w istocie bliższe łacińskiej etymologii [przyp. tłum].

[67*] Nadciekłość to stan materii, który odznacza się zerową lepkością. Podobnie jak nadprzewodnictwo, efekt ten jest z gruntu kwantowy. Obserwuje się go dla helu schłodzonego niemal do temperatury zera bezwzględnego, a także dla ultrazimnych gazów atomowych [przyp. tłum.].

[68*] Mówiąc ściślej, gęstość energii próżni powinna być proporcjonalna do czwartej potęgi energii Plancka [przyp. tłum.].

[69*] „Ilość sigm” jest miarą statystycznej pewności, czy wynik danego pomiaru nie jest fałszywie pozytywny. Powszechnie stosuje się „regułę trzech sigm”, zgodnie z którą istotność 3 σ jest wystarczająca, ponieważ szansa na to, że wynik jest dziełem przypadku, wynosi wówczas niecałe 0,3 procent (przy pewnych założeniach). W fizyce cząstek obowiązuje bardziej wyśrubowany standard – dopiero 5 σ uprawnia do mówienia o rzeczywistym odkryciu (prawdopodobieństwo pomyłki jest wtedy rzędu 0,00003 procent) [przyp. tłum].

[70*] Planck był misją kosmiczną realizowaną przez Europejską Agencję Kosmiczną w latach 2009–2013. Jej celem było sporządzenie dokładnej mapy fluktuacji termicznych mikrofalowego promieniowania tła. Część danych zebranych przez teleskop kosmiczny Plancka jest wciąż analizowanych.

[71*] Niechęć fizyków do filozofii ma znacznie wcześniejsze źródła. Najczęściej w tym kontekście wymienia się tak zwanych pozytywistów logicznych spod znaku Koła Wiedeńskiego (lata dwudzieste i trzydzieste XX wieku) oraz jeszcze wcześniejsze postulaty Ernsta Macha (koniec XIX wieku), by oczyścić fizykę z wszelkich „wtrętów metafizycznych”. Por. M. Heller, *Filozofia nauki. Wprowadzenie*, Petrus, Kraków 2008 [przyp. tłum.].

[72*] W istocie owo czasopismo *nie powoływało* wówczas zewnętrznych recenzentów nadsyłanych artykułów. Opis całej mistyfikacji (wraz z pełnym tekstem opublikowanego artykułu) można znaleźć w: A. Sokal, J. Bricmont, *Modne bzdury. O nadużywaniu pojęć z zakresu nauk ścisłych przez*

postmodernistycznych intelektualistów, tłum. P. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2004 [przyp. tłum.].

[73*] Ang. *wormholes*, dosłownie „robacze dziury” [przyp. tłum.].

[74*] Obecnie mówi się raczej o połowie lat dwudziestych XXI wieku [przyp. tłum.].

[75*] Chodzi o niewielki, ale teoretycznie istotny rozdźwięk między wartością tak zwanego anomalnego momentu magnetycznego mionu wynikającą z modelu standardowego a jego wartością zmierzoną na początku XXI wieku. Jeśli ów rozdźwięk nie okaże się fluktuacją statystyczną (obecnie jego istotność wynosi około 3,5 σ), będzie stanowić bezcenny przyczynek do fizyki wykraczającej poza model standardowy [przyp. tłum.].

[76*] W latach 2015–2017 trwała misja sondy kosmicznej *LISA Pathfinder*, której celem było zbadanie, czy właściwy projekt eLISA, polegający na umieszczeniu trzech składowych ultraprecyzyjnego interferometru na orbicie okołosłonecznej, da się w ogóle zrealizować. Misja zakończyła się sukcesem wielokrotnie przewyższającym oczekiwania. Niestety planowana data rozpoczęcia głównej misji to dopiero połowa lat trzydziestych XXI wieku [przyp. tłum.].